

Académie royale
des
Sciences d'Outre-Mer

CLASSE DES SCIENCES NATURELLES
ET MÉDICALES

Mémoires in-8°. Nouvelle série.
Tome XII, fasc. 3.

Koninklijke Academie
voor
Overzeese Wetenschappen

KLASSE VOOR NATUUR- EN
GENEESKUNDIGE WETENSCHAPPEN

Verhandelingen in-8°. Nieuwe reeks.
Boek XII, aflev. 3.

Rôle écologique
des eaux de la Cuvette congolaise
sur la
croissance de la jacinthe d'eau
[*Eichhornia crassipes* (MART.) SOLMS]

PAR

A. BERG

INGÉNIEUR AGRONOME DES EAUX ET FORÊTS
LICENCIÉ EN SCIENCES ZOOLOGIQUES
ANCIEN ASSISTANT À LA DIVISION D'HYDROBIOLOGIE PISCICOLE DE
L'I.N.É.A.C. À YANGAMBI (CONGO)

Mémoire couronné au Concours annuel 1960 de l'A.R.S.O.M.



Rue de Livourne, 80A,
BRUXELLES 5

Livornostraat, 80A,
BRUSSEL 5

1961

PRIX : F 150
PRIJS:

Rôle écologique
des eaux de la Cuvette congolaise
sur la
croissance de la jacinthe d'eau
[*Eichhornia crassipes* (MART.) SOLMS]

PAR

A. BERG

INGÉNIEUR AGRONOME DES EAUX ET FORÊTS
LICENCIÉ EN SCIENCES ZOOLOGIQUES
ANCIEN ASSISTANT À LA DIVISION D'HYDROBIOLOGIE PISCICOLE DE
L'I.N.É.A.C. À YANGAMBI (CONGO)

Mémoire couronné au concours annuel 1960.
Rapporteurs : MM. J. LEBRUN et W. ROBIJNS.

Rôle écologique des eaux de la cuvette congolaise sur la croissance de la jacinthe d'eau

AVANT-PROPOS

Depuis quelques années, la jacinthe d'eau [*Eichhornia crassipes* (MART.) SOLMS] a envahi le réseau hydrographique congolais où elle a trouvé sur le fleuve Congo lui-même des conditions particulièrement favorables à son développement. Le Congo devenait ainsi à son tour victime de l'introduction inconsidérée d'une plante qui, pour la beauté de ses fleurs, a été propagée par l'homme comme plante d'ornement avant d'envahir les eaux naturelles.

Il suffira de rappeler les principales étapes de cet envahissement [28] (*) : originaire de l'Amérique du Sud tropicale et de l'Amérique centrale, elle fut introduite en Louisiane en 1884, où elle devint rapidement un fléau pour la navigation sur le Mississipi. Ensuite, Java (1894) et toute l'Indonésie, Madagascar (1900), l'Indochine (1902), les Indes, Ceylan (1905), les Philippines, le Japon et l'Australie payèrent leur tribut à cette plante qui pourtant ne s'était pas fait faute de manifester ses dangers en plus de ses charmes.

Au Congo, après une propagation rapide sur le fleuve et certains affluents, la jacinthe d'eau a cependant atteint des limites d'extension imposées à la fois par des conditions naturelles de composition physico-chimique des eaux et par des conditions artificielles de propagation et de destruction par l'homme.

Le présent mémoire a pour but de mettre en lumière les facteurs qui permettent d'expliquer la répartition actuelle de la jacinthe d'eau dans le bassin congolais. Il concerne plus spécialement la composition physico-chimique des eaux congolaises et la recherche du facteur qui, dans cette composition et pour certaines

(*) Les chiffres entre [] renvoient à la bibliographie *in fine*.

rivières, constitue fort heureusement un obstacle à l'envahissement par la jacinthe d'eau.

Les recherches qui ont permis la rédaction de ce travail ont été entreprises pendant trois ans dans le laboratoire de la Division d'Hydrobiologie piscicole de l'I.N.É.A.C. (1) à Yangambi.

Qu'il nous soit permis de remercier ici tous ceux qui, dans cet Institut, par leurs conseils et leur aide matérielle, ont permis de mener à bien ce travail. Ces remerciements s'adressent particulièrement à notre collègue M. J. GOSSE, pour sa contribution importante au programme d'analyse des eaux et son active collaboration dans la recherche, ainsi qu'à M. E. GORHAM (University of Toronto, Canada) et M. J. SPAAS (I.N.É.A.C.), pour leur contribution respective à la rédaction des résumés anglais et néerlandais.

(1) Institut National pour l'Étude Agronomique du Congo.

CHAPITRE I.

Composition physico-chimique des eaux de la cuvette congolaise.

Introduction.

Grâce à la création, en Afrique, de laboratoires scientifiques bien équipés, l'étude de la composition physico-chimique des eaux de la cuvette congolaise a pu être entamée avec fruit. Si des résultats fragmentaires ont été publiés précédemment [7 ; 8], aucune étude d'ensemble n'avait encore été entreprise. Elle nécessitait la mise au point préalable de méthodes d'analyse adéquates, permettant la détermination de teneurs minérales très faibles en présence de matières organiques colorées. Le présent chapitre concerne principalement les eaux de la cuvette centrale congolaise et, dans une moindre mesure, celles des plateaux du Nord du Congo (Uele, Ubangi), à l'exclusion des eaux des plateaux du Sud (Bas Congo, Kwango, Kasai, Katanga) et des régions montagneuses de l'Est (à propos de ces dernières, voir MARLIER [23 ; 24]).

Deux importantes séries de prélèvements d'eaux ont été effectuées au cours des années 1958 et 1959 et ont servi de base à cette étude : d'une part, dans la région de Yangambi, 14 stations différentes (13 cours d'eau et un lac) ont fait l'objet de 28 prélèvements répartis sur 13 mois ; d'autre part, dans le cadre d'une enquête sur la jacinthe d'eau, 35 stations, représentant 17 cours d'eau navigables et un lac, ont fait l'objet de 4 prélèvements répartis sur une année. Les facteurs chimiques et physico-chimiques étudiés ont été les suivants : Température — pH — Conductivité électrique — Opacité totale (turbidité + couleur) — Couleur réelle — Alcalinité — Acidité — Oxydabilité — Oxygène dissous — Silice — Fer — Azote ammoniacal et nitrique — Dureté totale (Ca + Mg) — Sodium — Potassium — Chlorure — Phosphore.

Faute de méthode d'analyse adéquate, l'ion sulfate n'a malheureusement pu être déterminé.

Les méthodes d'analyse utilisées seront décrites dans une prochaine publication.

Critères généraux de classification des eaux de la cuvette congolaise

Alors que la composition minérale des eaux sert généralement de base pour leur classification, ce facteur ne peut être utilisé dans le cas des eaux de la cuvette congolaise à cause de leurs teneurs minérales moyennes ou très faibles.

Dans la recherche d'un critère de classification, on est amené tout naturellement à tenir compte des conditions géomorphologiques particulières du Congo.

Au centre du bassin congolais s'étend la cuvette centrale au sol très pauvre, occupée par une végétation forestière où dominent, principalement le long du réseau hydrographique, les forêts marécageuses et périodiquement inondées ; autour de cette cuvette s'étendent des régions de plateaux, recouvertes de sols moins pauvres et occupées par une végétation de forêt ou de savane. Or, dans la composition physico-chimique des eaux congolaises, deux facteurs présentent des résultats analytiques qui, de prime abord, s'avèrent particulièrement différents suivant qu'il s'agisse des eaux de la cuvette ou des eaux de plateaux : ce sont le pH et la dureté totale. Les rivières originaires des plateaux ont un pH supérieur à 6 et une dureté totale de plusieurs mg/l d'ion Ca ; les rivières de la cuvette ont, au contraire, un pH voisin ou inférieur à 5 et une dureté totale n'excédant pas 1 mg/l. Les rivières issues du mélange d'eaux de plateaux et de cuvette, constituent des cas intermédiaires qui seront envisagés plus loin.

Si les différences de richesse minérale des sols de plateaux et de cuvette peuvent expliquer la dureté totale moindre des eaux de la cuvette, elles ne peuvent expliquer cependant les différences très fortes de pH. L'équilibre acide carbonique-bicarbonates-carbonates, classiquement décrit en chimie des eaux comme responsable des variations de pH de 6 à 8, ne peut en effet intervenir dans le cas de pH voisins ou inférieurs à 5. De tels pH ne peuvent s'expliquer que par une acidité libre importante. Dans le cas des eaux de la cuvette congolaise, cette acidité libre provient de ma-

tières organiques acides en solution dans l'eau, conférant à cette dernière une coloration brune caractéristique. Ces matières organiques acides étant des produits de décomposition incomplète de matières végétales, sont communément désignées sous le nom de matières humiques.

C'est principalement dans les lacs des régions tempérées et subarctiques, alimentés en eaux de tourbières, qu'ont été étudiées jusqu'à présent les eaux colorées en brun par les matières humiques [20 ; 18]. En dehors des régions équatoriales, leur localisation reste cependant assez limitée et leur importance du point de vue limnologique est faible. Par contre, dans les bassins du Congo et de l'Amazone [16], s'étendant de part et d'autre de l'Équateur, les eaux humiques constituent une part importante du réseau hydrographique.

Dans la classification des eaux de la cuvette congolaise, le degré de neutralisation de l'acidité humique représente un facteur intéressant et permet la distinction de trois principales catégories :

1^o Eaux « humiques acides », à neutralisation négligeable de l'acidité humique : il s'agit des eaux limitées à la cuvette centrale proprement dite ;

2^o Eaux humiques partiellement neutralisées : il s'agit principalement des eaux de rivières situées dans la cuvette et originaires des plateaux, dont la teneur minérale n'est pas suffisante pour neutraliser complètement l'acidité humique ;

3^o Eaux humiques complètement neutralisées : il s'agit principalement des eaux de rivières situées dans les régions de plateaux ou au début de leur parcours dans la cuvette, dont la teneur minérale moyenne est suffisante pour neutraliser complètement l'acidité humique.

Enfin, certains cours d'eau de plateaux peuvent à certaines périodes de l'année être dépourvus de matières humiques en solution et se ranger dans les eaux classiquement décrites en chimie des eaux.

§ 1. Les eaux humiques acides.**I. DÉFINITION**

Sans entrer dans une discussion théorique sur les définitions toujours empiriques des matières humiques proposées en pédologie, nous appliquerons ce terme aux substances acides de coloration brune, issues de la décomposition anaérobie des matières végétales et conférant à l'eau une coloration caractéristique et un certain degré d'acidité non carbonique.

Nous réservons le terme d'eaux humiques acides aux eaux dont le constituant principal est représenté par ces matières humiques acides. La teneur minérale y étant par ailleurs très faible, le degré de neutralisation éventuelle de l'acidité humique par des cations minéraux est nul ou très faible. Cette teneur minérale peut être caractérisée par la dureté totale (Ca + Mg) qui est toujours inférieure à 1 mg/l Ca.

Dans ces conditions, le pH ne dépendra essentiellement que de la teneur en matières humiques acides et non pas d'un système tampon comme dans les eaux classiques bicarbonatées.

Ne rentrent pas dans cette catégorie les eaux qui, bien que colorées en brun par des matières humiques, présentent une teneur minérale non négligeable et qui, de ce fait, ont un pH plus élevé que celui d'une eau de même coloration, appartenant à la catégorie considérée.

II. CARACTÉRISTIQUES ESSENTIELLES

Il ne rentre pas dans le cadre de ce travail de donner ici tous les résultats d'analyses qui ont permis de dégager les caractéristiques essentielles des eaux humiques acides telles qu'elles seront décrites ci-dessous.

Le détail de ces résultats met en évidence l'indiscutable homogénéité de constitution des eaux humiques acides. Les graphiques et tableaux inclus dans ce mémoire résument les données recueillies et permettent une compréhension suffisante du rôle écologique de ces eaux.

Dans l'exposé des caractéristiques essentielles de cette catégorie d'eaux, il convient d'étudier séparément la teneur en matières humiques acides et la teneur minérale.

A. La teneur en matières humiques acides conditionne directement les variations de plusieurs autres facteurs chimiques et physico-chimiques importants :

— Le pH : il peut varier de 5,2 à 3,5 ;

— La conductivité électrique : à cause de la teneur minérale très faible, cette conductivité est principalement sous la dépendance de l'ion H^+ et donc du pH. Elle varie d'une valeur voisine de 10 aux pH de 5 à 130-140 micromho/cm aux pH de 3,5 ;

— La coloration brune est d'autant plus intense que le pH est bas. Exprimée en degrés HAZEN, elle varie de 20 à plus de 800. La mesure plus objective de densité optique à 400 $m\mu$ a été utilisée pour la constitution des graphiques (sous le nom de couleur réelle) ;

— L'acidité (non carbonique) varie de 0,040 à quelque 0,900 mequ/l ;

— L'oxydabilité : en relation directe stricte avec la coloration, elle varie dans les conditions expérimentales utilisées, de 2 à 87 mg O_2 consommé par litre.

B. Teneur minérale :

— Alcalinité nulle : absence de bicarbonates ;

— Teneurs ioniques très faibles, inférieures à 1 mg/l pour les ions les plus abondants, Ca, Mg, Na, K, Cl.

C. Parmi les autres propriétés physiques et physico-chimiques de ces eaux, signalons la température relativement faible (20-25° C), sauf pour les grands cours d'eau, davantage exposés à l'insolation.

Malgré leur coloration brune, ces eaux sont généralement limpides, de turbidité nulle ou très faible, représentée presque uniquement par du matériel grossier.

Signalons enfin la teneur en oxygène dissous, en relation directe avec le pH, donc faible aux pH bas, proche de la saturation aux pH supérieurs.

III. EXPLICITATION DES DIFFÉRENTS POINTS CITÉS

A. *Teneur en matières humiques acides*

La représentation graphique des relations entre les différents facteurs chimiques et physico-chimiques qui sont directement sous la dépendance de la teneur en matières humiques acides, est particulièrement intéressante.

Les relations avec le pH permettent tout spécialement une meilleure compréhension de la constitution physico-chimique de ces eaux.

1. *Relation conductivité /pH et teneurs cationiques.*

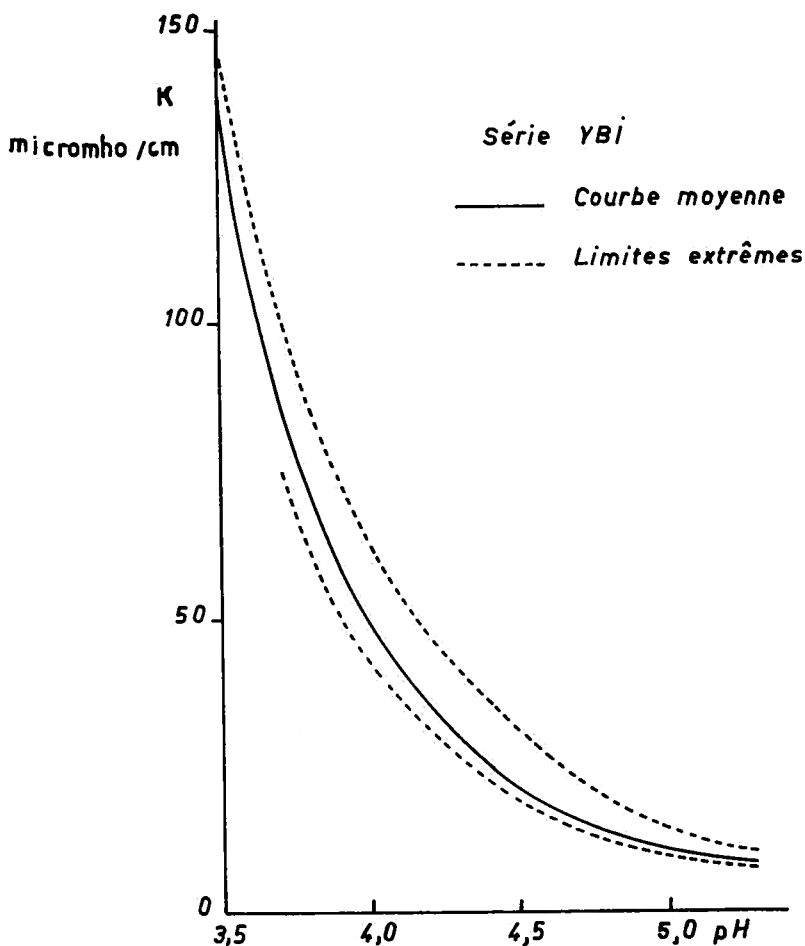
Il convient de rappeler ici que l'augmentation de la conductivité en fonction du pH est considérée en chimie des eaux comme une loi générale. Comme l'indique le *graphique 1*, la catégorie des eaux humiques acides fait exception à cette loi, ce qui indique déjà clairement qu'elle doit se ranger nettement à part des eaux bicarbonatées classiques.

La compréhension de cette relation k /pH (k =conductivité électrique) est assez aisée à la lumière des caractéristiques exposées précédemment. La teneur minérale étant très faible, le pH étant par ailleurs nettement acide, l'ion principal qui intervient dans la conductivité est l'ion H^+ . L'allure exponentielle de cette courbe n'est que la conséquence de la définition logarithmique du pH ; la conversion du pH en concentration en H^+ fournit en effet une relation $k/[H^+]$ linéaire.

Il convient d'explicitier plus particulièrement la relation k /pH, car c'est elle qui résume le mieux les propriétés essentielles des eaux humiques acides. Rappelons tout d'abord que la conductivité électrique est la somme des conductivités partielles des différents ions en solution.

Dans une solution diluée où les ions n'exercent entre eux aucune interaction, la conductivité partielle de chaque ion n'est fonction que de son pouvoir de conductivité spécifique (conductance ionique) et de sa concentration :

$$k_i = l_i c_i$$



GRAPHIQUE 1. — Relation conductivité/pH.

De par leurs teneurs ioniques très faibles, les eaux humiques acides constituent des solutions suffisamment diluées pour permettre l'application immédiate de ces données théoriques de conductivité.

Si nous représentons schématiquement l'acidité humique des eaux humiques acides par le symbole $\text{H Hum} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{Hum}^-$, où Hum^- désigne des anions organiques complexes, sans individualité chimique définie, nous sommes d'abord amenés à considérer la

conductivité partielle des 2 ions H^+ et Hum^- , responsables de cette acidité humique. L'ion H^+ doit jouer un rôle primordial dans la conductivité, d'une part à cause de sa conductance ionique particulièrement grande (330 à 21° C au lieu de 50-70 pour les autres ions minéraux), d'autre part à cause de sa concentration appréciable aux pH bas. En dehors de l'acidité humique, les sels minéraux (chlorures, sulfates, nitrates) et éventuellement des humates (sels correspondant aux acides humiques) interviennent pour une part faible dans la conductivité.

Schématiquement, nous pouvons écrire :

$$k_{tot.} = k_{acide} + k_{satine}$$

où $k_{ac.} = k_{H^+} + k_{Hum^-}$

et $k_{sal.} = k_{Na^+} + k_{K^+} + k_{Ca^{++}} + k_{Mg^{++}} + k_{NH_4^+} + k_{Cl^-} +$
 $k_{SO_4^{--}} + k_{NO_3^-} + k_{Humate}$

On voit d'après cette formule que si nous parvenons à évaluer $k_{ac.}$, une simple mesure de k nous fournit une évaluation de $k_{sal.}$, valeur que nous pouvons dès lors comparer à celle qui est fournie par les résultats analytiques portant sur les différents ions. Si cette étude porte sur un nombre considérable d'échantillons, elle permet l'établissement de moyennes particulièrement intéressantes pour la connaissance de la constitution physico-chimique des eaux humiques acides. Aussi nous paraît-il utile de détailler quelque peu les opérations effectuées.

a. *Estimation de $k_{ac.}$*

La mesure de pH fournit la concentration en H^+ et Hum^- , avec une erreur inversement proportionnelle au pH. La conductance ionique de H^+ est de 330 à 21° C, température à laquelle ont été rapportées toutes les mesures de k effectuées. La conductance ionique de Hum^- doit être faible, comme celle de tous les ions organiques ; sans erreur appréciable pour $k_{ac.}$, elle pourrait être estimée égale à 35 à 25° C, soit environ 32 à 21° C. La somme des conductances ioniques de H^+ et Hum^- serait donc égale à $330 + 32 = 362$, et $k_{ac.} = 362 \times [H^+]$, où $[H^+]$ découle immédiatement du pH.

b. *Calcul de $k_{sal.}$*

$$k_{sal.} = k_{tot.} - k_{ac.}$$

Ex. : Soit un pH mesuré de 3,70, k à 21° C, mesuré égal à 84,6 micromho/cm ;

$$[H^+] = \text{antilog}(-3,70) = 0,200 \text{ mequ/l}$$

et

$$k_{ac.} = 362 \times 0,200 = 72,4$$

$$k_{sat.} = 84,6 - 72,4 = 12,2$$

c. *Estimation de $k_{sat.}$ à partir des résultats analytiques.*

La composition anionique est incomplètement connue à cause de SO_4 non mesuré. Par contre, la composition cationique (Na, K, Ca, Mg, NH_4) est déterminée avec une précision satisfaisante. Si l'on admet que la concentration en SO_4 est telle qu'elle vient combler le déficit des anions mesurés Cl et NO_3 par rapport aux cations (en supposant par conséquent qu'il n'y a pas d'humates NaHum, KHum... en solution) et en se basant sur une composition minérale moyenne des eaux humiques acides telle qu'elle découle de l'ensemble des analyses effectuées, on peut déterminer pour l'ensemble de ces ions minéraux et sans erreur appréciable, une conductance ionique moyenne égale à 65 à 21° C. Dès lors $k_{sat.}$ peut être calculé à partir des résultats analytiques :

$$k_{sat.} = 65 \times CM^+ \times 2 = 130 \times CM^+$$

où 65 représente la conductance ionique moyenne, CM^+ la concentration totale en mequ/l des cations, telle qu'elle découle des données analytiques,

× 2, pour y inclure la part de k due aux anions.

Exemple : Reprenons l'exemple ci-dessus avec les données analytiques suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Na} & 0,35 \text{ mg/l soit } 0,015 \text{ mequ/l} \\ \text{K} & 0,7 \text{ mg/l soit } 0,018 \text{ mequ/l} \\ \text{Ca} + \text{Mg (en Ca)} & 0,7 \text{ mg/l soit } 0,035 \text{ mequ/l} \\ \text{N} - \text{NH}_4 & 0,18 \text{ mg/l soit } 0,013 \text{ mequ/l} \end{aligned}$$

$$CM^+ = 0,081 \text{ mequ/l}$$

$k_{sat.}$ mesuré = $130 \times 0,081 = 10,5$ (contre 12,2 pour $k_{sat.}$ calculé ci-dessus).

Cette étude a pu être faite sur les 2 séries d'échantillons prélevés (série Yangambi YBI et série *Eichhornia crassipes* EC). Pour les échantillons EC, il n'a malheureusement pas été possible de mesurer NH_4 à cause des modifications inévitables au cours de la conservation. Sans erreur appréciable, NH_4 peut, pour cette série, être estimé à 0,006 mequ/l. De plus, tous les échantillons de cette

série EC n'ont pu être inclus dans cette étude à cause de résultats analytiques manquants.

Le groupement des résultats par pH décroissant fournit le *tableau 1*; au bas du tableau figurent les valeurs moyennes pour le total des échantillons analysés.

Tableau I. — Conductivité saline et composition cationique moyennes en fonction du pH, des eaux humiques acides.

pH	$k_{sal.}$ calc. micro- mho/cm		Composition cationique en mequ/l									$k_{sal.}$ me- suré mi- cromho/ cm	
			Na		K		Ca + Mg		NH ⁴		C _{M+}		
	YBI	EC	YBI	EC	YBI	EC	YBI	EC	YBI	YBI	EC	YBI	EC
≥ 5	6,8	8,9	10,0	15,0	9,0	25,5	28,3	30,0	3,2	50,5	76,5	6,6	9,9
4,8-4,9	8,0	8,9	12,9	15,0	13,5	25,5	30,0	30,0	4,7	61,1	76,5	7,9	9,9
4,6-4,7	9,2	8,9	14,0	14,5	15,3	20,0	30,8	37,5	5,0	65,1	78,0	8,5	10,1
4,4-4,5	10,7	9,3	19,3	18,0	19,0	19,0	33,6	38,3	8,6	80,5	81,3	10,5	10,6
4,2-4,3	10,5	9,9	16,5	16,3	23,8	17,5	32,0	42,5	9,9	82,2	82,3	10,7	10,7
4,0-4,1	14,6	9,0	20,2	15,0	26,4	16,7	27,0	26,4	10,0	83,6	64,1	10,9	8,3
3,8-3,9	13,4	12,6	15,3	15,2	13,2	14,8	25,4	23,0	11,8	65,7	59,0	8,5	7,6
3,7	16,9	—	15,5	—	16,9	—	23,8	—	12,8	69,0	—	9,0	—
3,6	18,2	—	14,3	—	19,3	—	13,3	—	15,7	62,0	—	8,1	—
Moyennes générales	11,3	9,7	14,5	15,8	15,3	15,5	29,4	33,1	8,3	67,5	70,4	8,8	9,2

Discussion.

Il ne faut tenir compte que de l'allure générale des variations en fonction du pH, certaines classes de pH représentant surtout des variations saisonnières passagères (surtout dans la série YBI) et non systématiques.

1. — $k_{sal.}$ calculé :

YBI : en nette augmentation par baisse du pH ;

EC : en faible augmentation par baisse du pH.

2. — Na :

YBI : en augmentation jusqu'à pH 4,4-4,0, en diminution aux pH plus bas ;

EC : assez constant.

3. — K :

YBI : en augmentation jusqu'à pH 4,0, plus faible aux pH inférieurs ;

EC : en diminution par baisse du pH.

4. — $Ca + Mg$:

YBI : assez constant jusqu'à pH 4,0. En nette diminution aux pH plus bas ;

EC : en augmentation jusqu'à pH 4,2, en nette diminution aux pH plus bas.

Cette diminution de la dureté totale aux pH bas ne doit pas être réelle, mais inhérente à la méthode d'analyse. La méthode complexométrique utilisée, très commode et précise aux faibles colorations, n'est pas aussi satisfaisante aux pH bas, à cause de l'interférence de la couleur propre de l'eau et à cause d'autres interférences non encore précisées qui parviennent à masquer parfois complètement le Ca présent.

Quoiqu'il en soit, la dureté totale aux pH ≤ 4 ne doit guère se situer au-dessus des valeurs trouvées aux pH plus élevés.

5. — NH_4 :

YBI : très forte augmentation par baisse du pH. Dans les conditions anaérobies de formation des matières humiques acides aux bas pH, NH_4 se forme de préférence à NO_3 .

6. — *Concentration cationique totale* CM^+ (et k_{sal} mesuré qui en découle directement) :

YBI : en augmentation jusqu'à pH 4,0, plus faible aux pH inférieurs ;

EC : assez constant jusqu'à pH 4,2, plus faible aux pH inférieurs.

7. — *Comparaison* k_{sal} calculé et k_{sal} mesuré :

a) *Série YBI* : bonne correspondance jusqu'à pH 4,2. Aux pH inférieurs, la première l'emporte nettement sur la seconde.

La bonne correspondance observée de pH 5,2 à pH 4,2 permet d'admettre pour cette zone de pH les hypothèses posées au départ dans les calculs de la conductivité, à savoir :

- Conductivité acide k_{ac} voisine de $362 \times [H^+]$ à 21° C ;
- La concentration de l'ion SO_4 est telle qu'elle comble le déficit des anions Cl et NO_3 par rapport aux cations, ce qui implique l'absence quasi totale d'humates.

Aux pH ≤ 4 , il convient d'expliquer par contre la discordance entre les conductivités mesurée et calculée. Le masquage du Ca dont il est question ci-dessus, pourrait expliquer une part assez faible (1 à 2 unités de k) de la différence observée. Pour le reste, d'autres considérations semblent incriminer l'existence aux pH bas d'une acidité forte qui viendrait s'ajouter à l'acidité humique. A cause de la conductance ionique beaucoup plus forte de l'anion intervenant dans cette acidité forte (par exemple SO_4) par rapport à celle de Hum^- , il y a sous-estimation de k_{ac} . à ces pH faibles, et donc une surestimation de k_{sal} . calculé = $k_{tot.} - k_{ac}$. Cette hypothèse d'existence d'une acidité forte aux bas pH implique nécessairement l'absence totale d'humates, laissant la place aux sels d'acide fort.

b) *Série EC* : de pH 5,2 à 4,2, k_{sal} . mesuré l'emporte légèrement sur k_{sal} . calculé. Aux pH inférieurs, on note comme dans la série YBI que k_{sal} . calculé l'emporte au contraire assez fortement.

Interprétation : de pH 5,2 à 4,2, l'ion sulfate ne vient pas seul combler le déficit des anions Cl et NO_3 par rapport aux cations, mais l'ion humate intervient lui aussi pour une part non négligeable. De ce fait, il y a surestimation de k_{sal} . mesuré.

En dessous de pH 4,2, il faut admettre comme dans la série YBI l'existence d'une acidité forte.

8. — *La comparaison des deux séries d'analyses YBI et EC au point de vue de la composition cationique totale (CM^+)* indique une plus grande variabilité en fonction du pH pour les échantillons YBI. La même conclusion apparaît dans la comparaison de k_{sal} . calculé. Par contre, la comparaison entre les deux séries indique une très grande similitude entre les moyennes générales de tous les facteurs envisagés. La plus grande différence apparaît seule-

ment pour $k_{sal.}$ calculé et n'est due qu'à la plus grande proportion d'échantillons de bas pH dans la série YBI (entraînant, comme dit plus haut, une surestimation de $k_{sal.}$ calculé).

La similitude dans les moyennes, obtenue pour des échantillons prélevés dans l'ensemble de la cuvette, indique clairement l'homogénéité minérale indiscutable des eaux humiques acides sur toute l'étendue de la cuvette congolaise, de même que leur grande pauvreté minérale qui peut s'exprimer par une conductivité saline voisine de 10 ou par la concentration ionique correspondante, voisine de 0,075 mequ/l.

La plus grande variabilité observée dans la série YBI en fonction du pH, est la conséquence du « tamponnage » nécessairement plus faible vis-à-vis des variations de teneur minérale, dans les petites rivières échantillonnées dans cette série, que dans les grandes rivières représentant l'apport d'un bassin entier. Ce point sera d'ailleurs éclairci dans le paragraphe traitant des variations saisonnières (p. 25).

9. — *Établissement de la formule de la courbe k/pH .*

Nous avons vu plus haut la formule $k_{tot.} = k_{ac.} + k_{sal.}$. La conductivité acide ($k_{ac.}$) peut être estimée égale à $362 \times [H^+] = 362 \times \text{antilog} - pH$. Le *tableau 1* fournit par ailleurs les variations de $k_{sal.}$ en fonction du pH, pour les 2 séries YBI et EC. Ces variations d'allure générale curviligne peuvent, sans erreur appréciable, être rapportées à une droite de formule :

$$\begin{aligned} \text{YBI : } k_{sal.} \text{ calculé} &= 38,9 - 6,2 \text{ pH} \\ \text{EC : } k_{sal.} \text{ calculé} &= 25,2 - 3,6 \text{ pH} \end{aligned}$$

Les *graphiques 2* et *3* représentent, en fonction du pH, chacune des deux conductivités envisagées. Leur somme prend la forme d'une courbe groupant d'une manière très satisfaisante les différents points analytiques dont il convient à présent d'examiner les causes de la variabilité.

Variabilité des points de conductivité autour de la courbe en fonction du pH.

Il faut rappeler ici que l'erreur sur le pH ($\pm 0,05$) entraîne obligatoirement un certain degré de variabilité, spécialement aux pH

faibles. En dehors de cette variabilité expérimentale, il subsiste surtout des points hauts de k . Ils semblent s'expliquer principalement par une $k_{sat.}$ supérieure à la moyenne. Les ions responsables sont K et Ca + Mg, dont les teneurs augmentent assez fortement en période de crue subite. Aux pH faibles, une acidité forte supérieure à la moyenne peut également être responsable d'une conductivité supérieure.

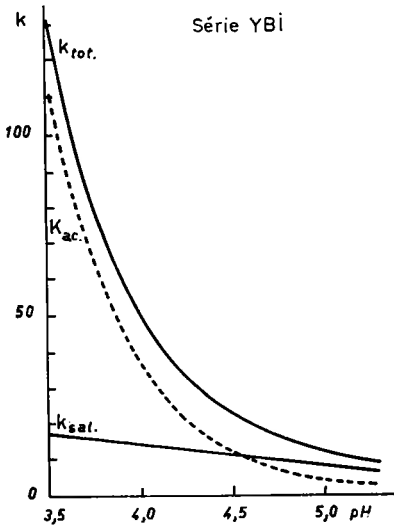
2. Relation Couleur réelle /pH.

La mesure de la densité optique à 400 $m\mu$ sous 1 cm d'épaisseur optique constitue ici la mesure objective de la couleur réelle (Cr). Les graphiques 4 et 5 représentent pour chacune des 2 séries YBI et EC, la variation de Cr en fonction du pH.

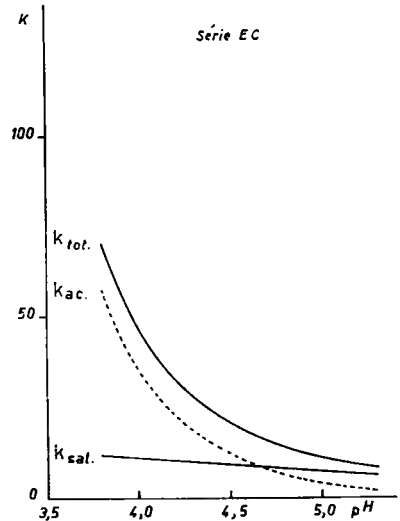
Comme pour la relation k/pH , l'allure des courbes est exponentielle. Convertie en fonction de la concentration en H^+ , la relation devient sensiblement linéaire.

On remarque immédiatement une variabilité plus grande que dans la relation k/pH . Deux explications de cette variabilité peuvent intervenir :

- a) A même coloration, l'acidité peut être plus ou moins forte;
- b) A même coloration et même acidité, le degré de dissociation



GRAPHIQUE 2. — k/pH , série YBI



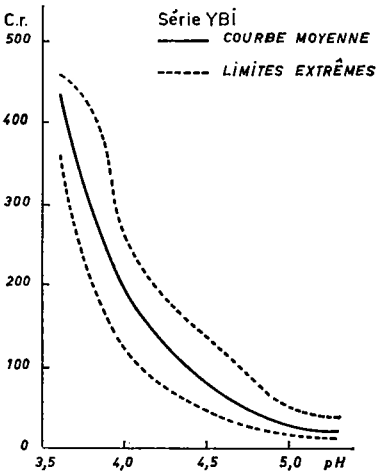
GRAPHIQUE 3. — k/pH , série EC.

de cette acidité peut être plus ou moins grand, notamment à cause de l'existence aux pH bas d'une acidité forte.

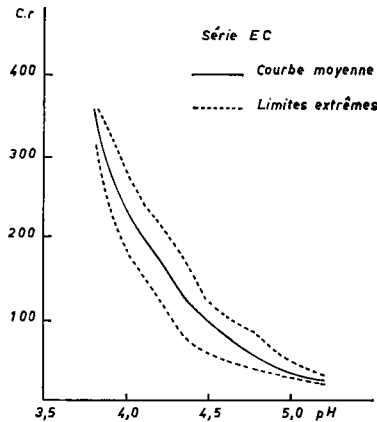
L'analyse des résultats permet de discriminer entre ces causes possibles de variabilité.

Comparaison des séries YBI — EC dans la relation Cr /pH.

Les graphiques 4 et 5 indiquent que la courbe de la série EC est légèrement supérieure à celle de la série YBI. La cause de cette différence réside dans l'acidité, en moyenne plus faible à même coloration, dans la série EC que dans la série YBI, ce qui entraîne, à même coloration, un pH plus élevé et donc une courbe Cr /pH supérieure. Cette acidité plus faible pour une même coloration dans la série EC, est par ailleurs à mettre en relation avec l'existence, signalée précédemment, d'une teneur non négligeable en humates, ces derniers intervenant dans la coloration, mais pas dans l'acidité.



GRAPHIQUE 4. — Cr /pH, série YBI



GRAPHIQUE 5. — Cr /pH, série EC.

Transmission de la lumière dans les eaux humiques acides.

Les valeurs de Cr à 400 m μ , très élevées aux pH bas, indiquent une très forte absorption de cette longueur d'onde dans ces eaux. Rappelons que la valeur de Cr désigne ici la densité optique \times 1 000 à 400 m μ , pour une épaisseur optique de 1 cm. Une valeur de

Cr 200, aux environs de pH 4 correspond donc à une densité optique pour 1 cm de 0,200 et, en vertu de l'expression densité optique = $-\log$ Transmission, une transmission égale à $\text{antilog } -0,2 = 0,16$, soit 16 % de transmission et 84 % d'absorption de la lumière de 400 m μ pour une épaisseur optique de 1 cm. Dans ces conditions, on peut calculer que pour cette longueur d'onde, la lumière sera réduite à 1 % de la lumière incidente (Transmission = 0,01 ; dens. opt. = 2 ; Cr = 2 000) à une profondeur de $2\,000/200 = 10$ cm.

Il convient de noter que la densité optique des eaux humiques acides diminue exponentiellement avec la longueur d'onde, une densité optique égale à 0,290 à 400 m μ devenant approximativement égale à 0,040 à 500 m μ et 0,005 à 700 m μ . Cette absorption plus faible de la lumière aux grandes longueurs d'onde confère à ces eaux une coloration brune caractéristique. Malgré la transmission plus forte aux longueurs d'onde supérieures, il n'en reste pas moins vrai que ces eaux constituent un milieu particulièrement absorbant vis-à-vis de la lumière, fait qui doit avoir une grande importance au point de vue écologique.

3. Relation Oxydabilité /pH.

Cette relation ne sera pas explicitée ici, étant donné qu'elle correspond très nettement à la relation Cr /pH. En d'autres termes, il apparaît une corrélation étroite entre la mesure physique de Cr à 400 m μ et la mesure chimique de l'oxydabilité, ce qui indique une certaine homogénéité dans les propriétés optiques (coloration) des matières humiques acides.

4. Relation Acidité /pH.

Alors que la notion d'acidité est, pour les eaux bicarbonatées, réservée à l'acide carbonique, elle concerne dans le cas des eaux humiques acides différents types d'acidité : acidité carbonique, acidité humique, acidité forte. L'acide carbonique, acide très faible, voit sa dissociation réduite en présence de l'acidité humique plus forte, ce qui signifie que dans les eaux humiques acides, l'acide carbonique dissous exerce une action faible sur le pH, action qui devient même nulle en dessous du pH 4,3.

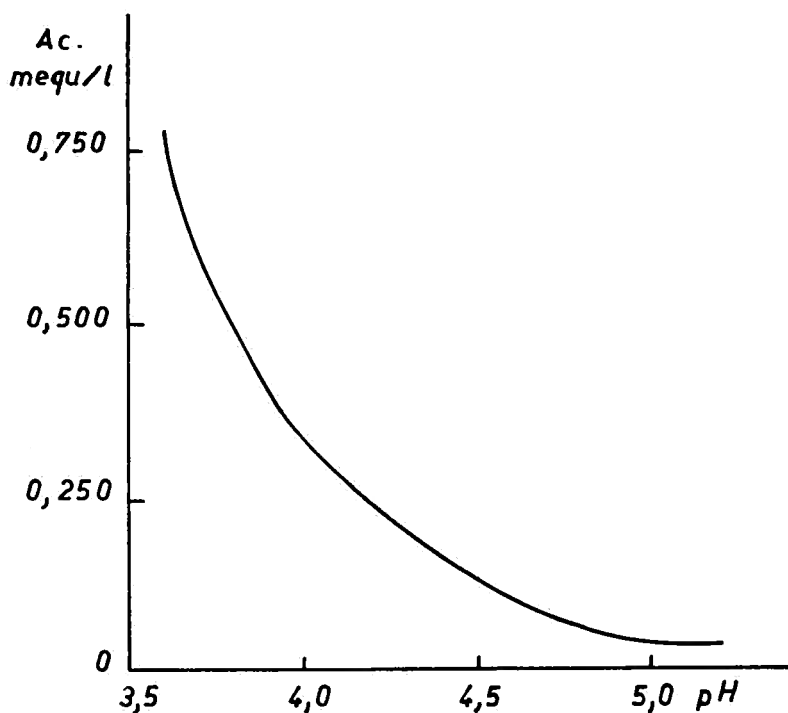
A ces pH, l'acide carbonique, quoique non dissocié, reste pré-

sent dans les eaux. Sa concentration est cependant limitée par l'absence de bicarbonates, point qui doit avoir son importance du point de vue écologique, notamment sur la photosynthèse.

Dans les eaux humiques acides, l'acide carbonique doit probablement constituer un produit final de décomposition biologique et chimique des matières organiques. Il est de ce fait abondant dans les eaux humiques « jeunes », directement issues des régions marécageuses. Par aération de l'eau dans les cours d'eau, l'acide carbonique est en partie dégagé. Aussi trouve-t-on une relation inverse entre l'acide carbonique et l'oxygène dissous (voir plus loin).

Pour la détermination de l'acidité non carbonique, responsable du pH, il convient d'éliminer l'acide carbonique dissous, ce qui peut se réaliser facilement par agitation de l'eau sous vide.

La relation de l'acidité non carbonique en fonction du pH est fournie par le *graphique 6*.



Graphique 6. — Acidité /pH

Il convient de remarquer que cette courbe ne représente l'acidité humique seule, qu'en l'absence d'acidité forte dont l'existence est probable vers pH4 et en dessous. Par ailleurs, dans le cas de l'existence d'humates, probable aux pH élevés dans certains échantillons de la série EC, il faut distinguer entre l'acidité humique et la capacité humique, cette dernière étant la somme de l'acidité humique et de la fraction de cette acidité neutralisée en humates.

Variabilité des points Ac /pH.

Les points hauts de la courbe Ac /pH semblent s'expliquer le plus souvent par un certain degré de neutralisation de la capacité humique qui confère à l'eau un certain pouvoir tampon responsable d'une acidité plus forte. Les points bas de la courbe Ac /pH semblent dus à l'existence d'une acidité forte plus importante que la moyenne.

B. Teneurs minérales.

1. Alcalinité nulle.

A cause de la présence d'une acidité humique plus forte que l'acidité carbonique, l'existence d'une teneur en bicarbonates n'est pas possible. Par ailleurs, nous avons vu que l'existence d'humates était possible aux pH élevés, mais leur faible teneur ne permettrait pas la mesure de cette « alcalinité humique ».

2. Teneurs ioniques très faibles.

a) Cations.

Les teneurs cationiques ont été discutées dans la relation conductivité /pH. Elles indiquent de prime abord l'extrême pauvreté des eaux humiques acides.

Il a été fait mention d'un éventuel masquage de Ca + Mg aux bas pH dans la mesure complexométrique utilisée.

La composition ionique relative des cations principaux des eaux humiques acides peut être comparée à celle qui est citée par RODHE (cf GESSNER [17]) comme « composition standard » des eaux du monde entier (voir *tableau II*).

Tableau II. — Composition cationique relative.

Cation	Eaux humides acides	Composition standard	Plantes
Ca	} 51	64	} 53
Mg		17	
Na	24	16	8
K	25	3	39

On voit qu'elle s'en distingue par une teneur relative beaucoup plus élevée en K, légèrement plus forte en Na et plus pauvre en Ca + Mg.

Étant donné la part importante que prennent, dans la composition des eaux humiques acides, les matières organiques issues de la décomposition des végétaux, il serait intéressant de comparer leur composition ionique relative à celle des plantes (3^e colonne, d'après les tableaux de BAUMEISTER [1]) : on constate que la teneur relative est à peu près identique en Ca + Mg, beaucoup plus élevée en Na et plus faible en K dans les eaux humiques acides que dans les plantes.

Alors que par leur composition, les eaux bicarbonatées classiques reflètent surtout la composition des sols, les eaux humiques acides reflètent plutôt la composition des plantes en ce qui concerne Ca, Mg et K et probablement celle des sols en ce qui concerne Na. Ceci laisserait supposer que la teneur relative de Mg (non mesuré comme tel) par rapport à la dureté totale (Ca + Mg) serait environ de 1/4, soit 0,008 mequ/l ou 0,1 mg/l Mg.

b) Anions.

— L'ion chlorure présente une concentration indépendante du pH. Pour l'ensemble des échantillons, la concentration moyenne a été trouvée égale à 0,019 mequ/l (0,67 mg/l) Cl dans la série YBI et 0,015 mequ/l (0,53 mg/l) dans la série EC.

— L'ion sulfate n'a pu être déterminé. Comme supposé plus haut, il vient probablement combler le déficit en anions Cl et NO₃ par rapport aux cations, sauf dans certains échantillons de pH élevé dans la série EC, où l'anion humate existe à une concentration non négligeable. La concentration probable en S-SO₄ serait ainsi de quelque 0,035 mequ/l, soit 0,56 mg/l S-SO₄.

— L'ion nitrate, généralement compris entre 0,05 et 0,25 mg/l N-NO₃, est en relation directe avec le pH, variant donc en sens inverse de l'ion NH₄. Ce fait doit être mis en relation avec les conditions anaérobies de formation des matières humiques acides : NH₄ s'y formera de préférence à NO₃. Dans les rivières à pH plus élevé, à proportion plus importante d'eaux de ruissellement, issues de conditions beaucoup plus aérées propices à la nitrification, l'ion nitrate l'emportera au contraire sur l'ion ammonium.

— L'ion phosphate (ou plutôt le P total tel qu'il a été mesuré dans les analyses après oxydation des matières organiques) semble présenter une corrélation négative avec le pH ; sa teneur d'environ 0,035 mg/l aux pH bas descend à quelque 0,015 mg/l aux pH voisins de 5. Cette relation n'est cependant pas stricte, certaines stations de bas pH pouvant présenter des teneurs plus faibles que la moyenne indiquée.

Ces eaux sont donc très pauvres en phosphore, d'autant plus qu'une partie seulement de cet élément est directement assimilable sous forme ionique de phosphate.

— L'ion humate semble exister dans certains échantillons de la série EC aux pH élevés. Sa faible concentration ne permet cependant pas sa mesure sous forme d'une « alcalinité humique ».

3. Teneurs en éléments non ionisés.

a) *L'oxygène dissous* varie en relation directe avec le pH, fait attribuable aux conditions anaérobies de formation des matières humiques acides. L'aération subséquente d'une eau courante aura comme effet de faire remonter la teneur en oxygène. Très faible dans les eaux de pH faible ($\ll 1$ mg/l O₂), cette teneur est très proche de la saturation dans les eaux de pH voisin de 5. On note une relation inverse entre l'oxygène et l'acide carbonique dissous, l'aération entraînant un dégagement de CO₂ d'origine endogène et une solubilisation de O₂ d'origine exogène.

b) *Silice*. La teneur en silice, la plus élevée des teneurs minérales, est généralement comprise entre 4 et 9 mg/l, les plus faibles teneurs paraissant en relation avec les pH bas.

La silice doit être dans ces eaux sous forme d'acide silicique colloïdal.

c) *Fer*. La teneur en fer est généralement comprise entre 0,05

et 1 mg/l et est en relation inverse avec le pH. Les pH bas entraînent en effet une solubilisation plus importante du fer, qui dans ces eaux, doit se trouver principalement sous une forme complexée par les matières humiques (HUTCHINSON [20]).

IV. VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA COMPOSITION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX HUMIQUES ACIDES.

A. Série YBI.

Des variations saisonnières assez considérables s'observent dans la composition physico-chimique des petites rivières humiques acides analysées dans la série YBI. Elles sont à mettre essentiellement en relation avec le régime des précipitations. La variation la plus importante concerne le pH et, par conséquent, tous les facteurs reliés directement au pH : une forte précipitation a pour effet, d'une part, d'augmenter les eaux de ruissellement, d'autre part de libérer dans la rivière les matières humiques acides formées dans les bas-fonds du lit du cours d'eau ou dans les régions marécageuses qui bordent souvent les rivières de la cuvette. Il s'en suit une diminution du pH avec variations correspondantes de la conductivité, de la couleur réelle, de l'oxydabilité et de l'acidité.

Aux périodes d'étiage, correspondant aux époques de relative sécheresse de la cuvette congolaise, le pH subit au contraire un relèvement considérable, surtout dans les eaux fortement acides issues de régions marécageuses. Les rivières alimentées par des sources plus régulières, conservent pendant ces périodes le pH limite 5,0-5,2 de cette catégorie d'eaux. Chaque rivière présente ainsi au cours de l'année des variations de pH comprises entre certaines limites variables suivant l'origine de leurs eaux (voir *tableau III*).

Ces variations du pH au cours de l'année sont en relation inverse avec les lectures d'étiage et en relation directe avec les précipitations, spécialement dans les rivières peu acides telles que la Lilanda.

Parallèlement aux variations de pH et des facteurs qui lui sont directement reliés, des variations de la teneur minérale sont également à considérer. Dans les rivières possédant un bassin à relief

Tableau III. — Limites de variation de pH des eaux humiques acides, série YBI.

	<i>Limites normales</i>	<i>Limites extrêmes supérieures (en fin de saison sèche)</i>
ISALOWE (Eaux issues de sources et de ruissellement)	4,60 à 5,10	5,10
LILANDA (Eaux issues de sources, de ruissellement et de drainage de régions marécageuses)	4,20 à 5,20	5,20
IKONGA (Eaux issues de sources (?) et de drainage de régions marécageuses)	4,25 à 4,70	—
LAC YANDJA (Lac recevant les eaux d'une vaste région marécageuse)	4,30 à 4,50 (milieu stable)	4,50
WANGA (Petite rivière drainant une région marécageuse)	3,80 à 4,10	Pollution au cours de la saison sèche
LOLA (Petite rivière drainant une région marécageuse)	3,50 à 4,30	4,75 Pollution en fin de saison sèche
LOKAI (Petite rivière drainant une région marécageuse)	3,70 à 4,25	4,45
BOHAMBIA (Rivière moyenne drainant une région marécageuse)	3,70 à 4,05	4,80

accidenté (l'Isalowe et, dans une mesure moindre, la Lilanda), aux eaux de ruissellement abondantes en périodes de fortes pluies, on note à ces époques, en même temps qu'un abaissement du pH, une augmentation de K, Ca + Mg, P et NO₃. Ce fait doit être attribué à la solubilisation par les eaux de ruissellement des éléments minéraux les plus mobiles contenus dans les couches superficielles du sol. On n'observe par contre aucune variation appréciable de Na et Cl.

Dans les rivières marécageuses, les modifications ioniques au cours des périodes de crue sont plus difficiles à interpréter. Alors que les ions Na, NH₄, Cl et NO₃ ne présentent pas de modifica-

tions sensibles, on peut noter aussi bien une augmentation qu'une diminution des concentrations des autres ions. L'étude des variations ioniques tout au long d'une seule crue et de la décrue qui lui fait suite avant le retour au régime normal d'une rivière, serait certes de nature à éclaircir ce problème. Il est en effet plausible que la solubilisation des éléments les plus mobiles s'effectue au début de la crue, entraînant une augmentation de concentration en ces éléments, suivie bientôt par un maximum puis par une diminution de concentration, qui correspond à un ralentissement de la solubilisation de ces éléments minéraux et à leur dilution par l'eau de pluie. Suivant le moment du prélèvement au cours de la crue, on pourra donc obtenir pour une même lecture d'étiage, des concentrations ioniques différentes.

Il semble opportun de donner ici les limites ordinaires des variations de concentrations ioniques, telles qu'elles découlent d'analyses systématiques effectuées sur 8 rivières humiques acides, à raison de 28 prélèvements répartis sur 13 mois (voir *tableau IV*). A côté des limites ordinaires, figurent les limites extrêmes obtenues en saison sèche aux périodes de très basses eaux (dont la durée est toujours faible en région équatoriale : 6 à 8 semaines). Ces limites extrêmes peuvent être également atteintes en période de forte crue, par des rivières recevant surtout des eaux de ruissellement (Isalowe).

Tableau IV. — Limites de variation des teneurs minérales des eaux humiques acides, série YBI.

	Limites ordinaires (mg/l)	Limites extrêmes supérieures
Na	0,2 à 0,6	0,7 à 0,8
K	0,2 à 1,0	1,2 à 1,9
Ca + Mg (en Ca)	0,3 à 0,9	1,1 à 1,5 (début des pluies après la saison sèche)
N-NH ₄	varie en fonction du pH	0,27 à 0,35
N-NO ₃	varie en fonction du pH	0,30 à 0,44 (en crue seulement)
Cl	0,4 à 0,9	—
P	varie en fonction du pH	0,050 à 0,100

Les variations ioniques au cours de la saison sèche peuvent se résumer comme suit :

— Dans les rivières non marécageuses (sources, ruissellement), le lit n'est jamais à sec ; un écoulement des eaux se maintient tout au long de la saison sèche. Le pH reste élevé (5,0-5,2) mais on ne note aucune modification appréciable dans les concentrations ioniques.

— Dans les petites rivières marécageuses, l'écoulement des eaux est pratiquement interrompu après quelques semaines de saison sèche et le thalweg est presque à sec. On note une augmentation très forte de K et P, une augmentation légère de NH_4 . Il n'y a par contre aucune modification appréciable de Na, Ca + Mg, Cl et NO_3 . Dès le début des pluies, les rivières reviennent à leur état normal, les teneurs en K et P baissent rapidement tandis que la concentration de Ca + Mg augmente très fortement pour revenir à la normale après un certain temps.

B. Série EC.

Le nombre limité de prélèvements répartis au cours d'une année (4 prélèvements) ainsi que le programme d'analyses moins complet que dans la série YBI, ne permettent qu'une discussion beaucoup moins complète des variations saisonnières.

Les variations de pH sont également en relation inverse très nette avec les lectures d'étiage, les périodes de crue coïncidant avec les pH les plus bas, les périodes d'étiage avec les pH les plus élevés rencontrés au cours de l'année. Une exception importante concerne le lac Tumba où la relation pH — lectures d'étiage est directe au lieu d'être inversée.

Les relations entre les variations de pH et le régime hydrographique des grandes rivières congolaises sont représentées dans les *graphiques 8, 9 et 10*, au chapitre II.

Les concentrations en éléments minéraux, tout en présentant des variations saisonnières faibles, n'atteignent pas les valeurs extrêmes trouvées pour les petites rivières des environs de Yangambi. L'explication de ce fait est assez simple à formuler. Les variations ioniques induites dans les petites rivières par les crues et décrues subites, doivent nécessairement s'atténuer dans une rivière importante, possédant un bassin étendu. Seules subsistent

dès lors les variations ioniques en relation avec le régime général des précipitations.

Dans ces conditions, il est probable que les limites extrêmes d'éventuelles variations de concentrations ioniques se situeraient aux périodes de crue et d'étiage. Le petit nombre de prélèvements ne permet pas d'établir cette relation. Quoi qu'il en soit, les résultats analytiques indiquent pour la série EC des variations de concentrations égales ou inférieures aux limites ordinaires décrites pour la série YBI. Il est vraisemblable que les limites extrêmes décrites pour cette série, ne soient jamais atteintes dans les grandes rivières.

V. VARIATIONS DE LA COMPOSITION PHYSICO-CHIMIQUE DES RIVIÈRES HUMIQUES ACIDES DE L'AMONT VERS L'AVAL.

L'examen de ce point a pu être réalisé pour les grandes rivières prospectées dans la série EC, grâce à plusieurs stations (généralement 2) réparties sur le cours de ces rivières.

A. *Variations du pH et des facteurs liés directement au pH.*

On note, tout au long du parcours dans la cuvette congolaise des grandes rivières humiques acides, une acidification progressive de l'amont vers l'aval. Ce point doit être mis en relation avec la géomorphologie du bassin congolais esquissée plus haut. Alors que, sur les confins de la cuvette, les eaux de sources et de ruissellement contribuent pour une part encore importante au débit des rivières, dans le centre de la cuvette, au contraire, les rivières drainent de vastes régions marécageuses. Les bords de ces rivières y sont occupés par des forêts marécageuses ou périodiquement inondées, qui déversent dans les rivières des matières humiques acides responsables de l'abaissement du pH observé. La Ngiri semble seule faire exception à cette loi d'abaissement du pH de l'amont vers l'aval (tronçon Bongenie-Bomongo), point qui s'expliquerait par la végétation, surtout de terre ferme, occupant les bords du cours moyen et inférieur de cette rivière (renseignements fournis par C. EVRARD, Mission botanique de la Tshuapa, 1957-1959).

Le pH des eaux du cours inférieur des grandes rivières de la cuvette dépendra de la part respective des eaux peu acides originaires de l'amont, et des eaux très acides provenant des affluents de l'aval. Une rivière de longueur moyenne, au cours limité au centre même de la cuvette, telle que l'Ikelemba, présentera en aval les eaux les plus acides (pH 3,8 – 3,9) rencontrées dans les grandes rivières du Congo. Au contraire, la Ruki, dont les tributaires principaux (Tshuapa-Lomela) prennent leur source aux confins de la cuvette, possède en aval un pH beaucoup plus élevé (4,3 à 4,5). La Lulonga représente un cas intermédiaire entre l'Ikelemba et la Ruki, avec un pH en aval de 4,0 à 4,4.

B. Variations dans les concentrations ioniques de l'amont vers l'aval.

Dans les rivières limitées à la cuvette proprement dite, aucune modification appréciable ne semble intervenir dans la composition minérale de l'amont vers l'aval. C'est le cas de toutes les rivières humiques acides étudiées dans la série EC, à l'exception de la Tshuapa. Ce tributaire important de la Ruki prend ses sources aux confins de la cuvette proprement dite. Encore conviendrait-il de donner ici une définition de la cuvette centrale congolaise, afin de la délimiter d'une manière plus précise.

Nous réservons le terme de cuvette *sensu stricto* aux régions à relief déprimé, occupant le centre du bassin congolais qui, au point de vue botanique, sont recouvertes d'une végétation forestière où dominant les forêts marécageuses et périodiquement inondées, et au point de vue géologique, sont recouvertes de terrains récents alluvionnaires, d'origine fluvio-lacustre. Dès lors, sur les bases de la carte de la végétation du Congo (dressée par DEVRED [12]) et de la carte géologique du Congo (dressée par CAHEN et LEPERSONNE [5]), il apparaît que le cours supérieur de la Tshuapa déborde des limites de la cuvette ainsi définies, pour traverser des régions occupées par des forêts denses humides où peuvent affleurer par endroits des terrains du Karroo, parfois calcaires.

Si nous revenons aux variations des concentrations ioniques rencontrées de l'amont vers l'aval de la Tshuapa-Busira-Ruki, nous constatons une diminution progressive de ces concentrations (voir *tableau V*).

Tableau V. Variations de la dureté totale (Ca + Mg en mg/l Ca) dans la Tshuapa-Busira-Ruki.

Station	Prélèvements			
	I	II	III	IV
TSHUAPA Elingampangu	1,6	2,4	2,1	2,1
TSHUAPA Bokungu	1,5	1,3	2,2	1,6
RUKI Ingende	1,1	0,9	0,8	—
RUKI Eala	0,9	0,7	0,6	1,0

L'amont de la Tshuapa (Elingampangu-Ikela) doit, par le pH et la composition minérale, être classé parmi les rivières humiques partiellement neutralisées, nettement plus riches que les rivières humiques acides. Cette composition minérale, tout en s'appauvrissant vers l'aval, représente encore dans le cours inférieur de la Tshuapa, le passage progressif d'une rivière humique partiellement neutralisée à une rivière humique acide. Si la Busira et la Ruki peuvent être considérées comme rivières humiques acides typiques, il n'en reste pas moins vrai que leur teneur minérale est légèrement supérieure à celle des rivières humiques acides au cours limité à la cuvette proprement dite.

§ 2. Les eaux humiques partiellement neutralisées.

I. DÉFINITION.

Il s'agit d'eaux colorées en brun par des matières humiques, dont l'acidité originelle se trouve neutralisée en partie par des cations minéraux, alors que dans les eaux humiques acides, cette acidité n'était pas ou très peu neutralisée.

Le degré variable de neutralisation de l'acidité humique déterminera le pH suivant une formule analogue à celle des mélanges-tampons, faisant intervenir le log du rapport $[Sel]/[Acide]$, ou $[Humate]/[Ac. humique]$. Dans ces eaux peu acides, la dissociation de l'acide carbonique dissous interférera avec le rapport précité dans la détermination du pH.

A cause de l'acidité humique résiduelle, les eaux de cette caté-

gorie ont, comme les eaux humiques acides, une teneur nulle en bicarbonates.

Rappelons que cette catégorie est représentée par les rivières de la cuvette congolaise originaires des régions de plateaux périphériques, dont la teneur minérale n'est pas suffisante pour neutraliser complètement l'acidité humique.

II. CARACTÉRISTIQUES ESSENTIELLES.

Cette catégorie d'eaux ne peut être résumée en graphiques décrivant les relations avec le pH comme dans le cas des eaux humiques acides. En effet, alors que dans ces dernières, l'acide humique intervenait presque exclusivement pour déterminer le pH, trois facteurs interviennent ici, à savoir la fraction d'acidité humique neutralisée, la fraction d'acidité humique résiduelle et l'acide carbonique dissous, les diverses combinaisons de ces trois facteurs pouvant fournir des pH très variables.

Nous décrirons par conséquent les caractéristiques essentielles de cette catégorie d'eaux par l'exemple de trois rivières, représentant en quelque sorte les caractéristiques extrêmes et moyennes rencontrées dans cette catégorie.

A. *Rivière LUBILU*. — Eau peu humique (de faible coloration), dont les teneurs minérales ne sont que légèrement supérieures à celles des eaux humiques acides, mais suffisantes pour neutraliser partiellement l'acidité humique et fournir un pH voisin de 6.

B. *Rivière LOMAMI*. — Eau très humique (de forte coloration, pouvant en apparence être considérée comme rivière humique acide), à teneur minérale nettement supérieure à celle des eaux humiques acides, à pH moyen situé entre 6 et 7.

C. *Rivière TSHUAPA dans son tronçon amont*. — (Elingampangu-Ikela). Eau moyennement humique, à teneur minérale moyenne, à pH moyen voisin de 6.

III. DESCRIPTION DE LA COMPOSITION PHYSICO-CHIMIQUE DES DIFFÉRENTES RIVIÈRES CITÉES.

Cette description repose principalement sur les valeurs de concentrations moyennes des ions en solution et sur leur contribution dans la conductivité électrique mesurée.

Les différentes opérations sont semblables à celles que nous avons décrites pour les eaux humiques acides :

1) Conductivité saline calculée = k_{tot} mesurée — k_{ac} .

Cette dernière valeur (k acide) est toujours très faible aux pH supérieurs à 5 et de ce fait, la conductivité saline calculée est toujours très voisine de la conductivité totale mesurée.

2) Recherche de la composition ionique moyenne : cette composition découle des moyennes de concentration des différents ions, fournies par les résultats analytiques.

3) Le déficit des anions mesurés (Cl , NO_3) par rapport aux cations fournit la concentration totale en anions manquants, à savoir SO_4 et Hum.

4) L'ion SO_4 n'ayant pu être mesuré, il n'est pas possible de déterminer les teneurs relatives des ions SO_4 et Hum dans la concentration totale en anions manquants.

Pendant, par le graphique Acidité/Couleur réelle des eaux humiques acides, on peut avancer une valeur très approximative de la teneur en Hum, sous réserve qu'une petite partie de Hum intervenant dans la coloration, se trouve encore dans ces eaux sous forme non ionisée H-Hum. Dès lors, à partir de la concentration totale en anions manquants et de $[Hum]$ estimée de cette manière, on peut obtenir par différence une valeur estimée de $[SO_4]$. Comme dans toutes les eaux, il est logique d'admettre qu'un certain rapport existe entre les teneurs relatives de SO_4 et de Cl , ce rapport ne pouvant sans doute excéder 2, comme c'est d'ailleurs le cas dans les eaux humiques acides. Si on trouve donc, par la méthode décrite, une valeur estimée de SO_4 nettement trop élevée, il faut supposer l'existence d'une teneur en bicarbonates et classer l'eau dans la troisième catégorie des eaux humiques complètement neutralisées.

5) La conductivité électrique totale peut être considérée comme la somme des conductivités partielles des ions ainsi déterminés. Dans des eaux moins diluées que les eaux humiques acides, on peut cependant s'attendre à une interaction des ions dans la conductivité électrique. Dans ces conditions, la somme des conductivités partielles des ions en solution peut dépasser la valeur de conductivité mesurée. Ce calcul constitue en quelque sorte un contrôle des analyses physico-chimiques effectuées.

Nous fournissons dans le *tableau VI*, pour chacune des rivières citées, les différents facteurs intervenant dans les opérations dé-

crites : pH — conductivité saline — couleur réelle — concentrations cationiques et anioniques mesurées ou estimées (entre parenthèses) en $\mu\text{equ/l}$; de ces données découlent les sommes de conductivités partielles des ions analysés (Sk_i anal.), et des ions estimés ($k_i\text{Hum}$ et $k_i\text{SO}_4$). La dernière colonne fournit la somme des conductivités partielles ainsi déterminées (Sk_i).

Il faut noter que ces données moyennes ont été obtenues sur un nombre d'échantillons variable : 28 dans la série YBI, 4 ou 8 dans la série EC, suivant que l'on considère une seule station (Lomami EC à Opala) ou deux stations réunies (Tshuapa à Elingampangu et Ikela).

Discussion.

a) Les conductivités moyennes obtenues indiquent clairement une composition minérale plus riche que celle des eaux humiques acides. C'est au cours de la traversée de couches géologiques plus riches, situées en dehors de la cuvette congolaise où ces rivières prennent leur origine, que se produit l'enrichissement des teneurs minérales.

La Lubilu par exemple, petite rivière des environs de Yangambi, a ses sources situées dans les couches légèrement calcaires désignées sous le nom d'étage de Stanleyville, sur la carte dressée par CAHEN et LEPERSONNE [5].

Dans leur trajet dans la cuvette, ces rivières reçoivent des affluents à eaux humiques acides, d'où il résulte une certaine teneur en humates et une acidité humique résiduelle.

b) La Lubilu et la Tshuapa ont un pH moyen voisin de 6. De plus, leur faible teneur estimée en SO_4 indique qu'il s'agit certainement d'eaux humiques partiellement neutralisées. Le Lomami au contraire présente un pH voisin de la neutralité et une teneur estimée en SO_4 certainement trop élevée (entraînant un Sk_i également trop élevé par rapport à la conductivité mesurée).

Ceci signifie que cette rivière doit, tout au moins à certaines périodes de l'année et malgré sa forte teneur en matières humiques, être rangée dans les rivières complètement neutralisées. Aux périodes des hautes eaux au contraire, le Lomami présente un pH plus faible et est à considérer alors comme rivière humique partiellement neutralisée.

Tableau VI. — Composition physico-chimique moyenne des rivières humiques partiellement neutralisées.

	pH	k_{sat}	Cr	Concentrations ioniques en $\mu\text{equ/l}$								Sk _i anal.	k_i Hum	k_i SO ₄	Sk _i
				Na	K	Ca + Mg	NH ₄	NO ₃	Cl	Hum	SO ₄				
LUBILU (YBI) Yangambi	6,15	11,9	29	16,6	15,0	76,6	4,1	15,0	19,5	(55)	(23)	8,6	1,8	1,5	11,9
LOMAMI (YBI) Isangi	6,65	23,1	98	38,0	22,7	203,0	4,7	10,0	12,5	(170)	(76)	15,8	5,4	5,7	26,9
LOMAMI (EC) Opala	6,63	22,6	105	36,8	23,7	195,0	(5)	(10)	11,8	(180)	(59)	15,3	5,8	4,3	25,4
TSHUAPA amont (EC)	5,78	15,0	58	28,6	23,1	88,7	(6)	(14)	13,9	(95)	(24)	9,9	3,0	1,8	14,7

c) La couleur réelle de ces eaux peut être très variable, tout en étant inférieure à celles des eaux les plus brunes (de pH faible) de la catégorie précédente. Par contre, les matériaux grossiers en suspension leur confèrent une certaine turbidité que ne présentaient pas les eaux de la première catégorie.

d) L'allure des variations saisonnières de la composition physico-chimique de ces rivières, sera décrite avec les eaux de la troisième catégorie. Signalons que l'amplitude des variations est assez faible, ne dépassant généralement pas 30 % de part et d'autre des moyennes mentionnées de concentrations ioniques et de conductivité.

e) Les concentrations cationiques relatives seront également discutées dans le paragraphe traitant des eaux de la troisième catégorie.

§ 3. Les eaux humiques complètement neutralisées.

I. DÉFINITION.

Il s'agit d'eaux colorées en brun par des matières humiques, dont l'acidité originelle se trouve neutralisée complètement par des cations minéraux. Si on élimine de ces eaux l'acide carbonique dissous, leur pH doit se situer au-dessus du pH de neutralisation moyen de l'acidité humique, pH voisin de 7,6. L'acide carbonique dissous entraîne généralement un pH inférieur à cette valeur et voisine de 7.

Rappelons que cette catégorie est représentée par les cours d'eau situés dans les régions de plateaux ou au début de leur parcours dans la cuvette, dont la teneur minérale moyenne est suffisante pour neutraliser complètement l'acidité humique.

II. CARACTÉRISTIQUES ESSENTIELLES.

Cette catégorie se rattache assez aisément aux eaux bicarbonatées classiques. En effet, l'équilibre acide carbonique-bicarbonates y joue un rôle important dans la détermination du pH, à côté d'une teneur variable en humates, généralement plus faible

que la teneur en bicarbonates. L'acidité humique est évidemment nulle, laissant place à l'acidité carbonique.

Appartiennent à cette catégorie d'eaux, le fleuve Congo dans son trajet en dehors de la cuvette, le centre du fleuve Congo dans son trajet dans la cuvette et de nombreuses rivières importantes originaires des plateaux, telles que l'Aruwimi, l'Itimbiri, la Mongala, l'Uele et l'Ubangi (voir *carte II*, p. 60).

III. DESCRIPTION DE LA COMPOSITION PHYSICO-CHIMIQUE DES DIFFÉRENTS COURS D'EAU PROSPECTÉS.

Cette description se fera comme pour les eaux de la catégorie précédente, à partir des concentrations minérales des ions en solution, suivant les opérations décrites précédemment.

1) k_{sat} calculée = k_{tot} , étant donné $k_{ac} = 0$.
2) Composition ionique moyenne, telle qu'elle découle des résultats analytiques.

3) Le déficit des anions mesurés Cl et NO_3 par rapport aux cations fournit la concentration totale en anions manquants.

L'ordre de grandeur de cette valeur indique immédiatement qu'à côté de la teneur en Hum^- généralement faible et de SO_4 , doit exister une teneur appréciable en un autre anion, en l'occurrence HCO_3 (bicarbonate).

4) De l'estimation de la concentration en Hum^- (par le graphique Acidité/Couleur réelle), on déduit la somme des concentrations en SO_4 et HCO_3 , la concentration de HCO_3 devant l'emporter considérablement sur celle de SO_4 , qui présente probablement, comme dans toutes les eaux, un rapport S/Cl inférieur à 2.

5) Pour calculer la somme des conductivités partielles des ions en solution (Sk_i), il faudrait déterminer SO_4 . Étant donné la faible part de cet ion dans la somme $[\text{SO}_4] + [\text{HCO}_3]$, on pourrait cependant, avec une légère sous-estimation, attribuer cette somme au seul ion HCO_3 (sous-estimation due à la différence de conductance ionique entre SO_4 , 73,5 et HCO_3 , 40,9). Sk_i ainsi calculé doit être légèrement supérieur à la conductivité mesurée, étant donné l'interaction des ions dans une solution de concentration moyenne.

Ce calcul constitue un contrôle des analyses physico-chimiques effectuées.

Le *tableau VII* décrit la composition physico-chimique moyenne des différents cours d'eau humiques complètement neutralisés,

avec les mêmes données que celles qui ont été fournies pour les eaux de la deuxième catégorie. Il est à rappeler que $k_1\text{HCO}_3 + \text{SO}_4$ est attribué au seul ion HCO_3 .

Discussion.

a) La composition minérale de ces cours d'eau, nettement plus riche que dans la deuxième catégorie, est la conséquence de leur origine et de leur parcours important en dehors de la cuvette congolaise. Même à leur embouchure, le débit des rivières comme l'Aruwimi, l'Itimbiri, la Mongala et l'Ubangi, est principalement dû à l'apport des eaux plus riches originaires des plateaux, et pour une part plus faible à celui des eaux humiques acides pauvres de la cuvette.

La composition physico-chimique des eaux du fleuve Congo à son entrée dans la cuvette proprement dite (Yangambi), commence à refléter cet apport respectif des eaux plus riches de l'amont et plus pauvres de l'aval, par une différence assez considérable entre les eaux du centre du fleuve et celles des rives.

Cette différence s'accroît nettement en aval de Yangambi, point qui sera d'ailleurs détaillé plus loin.

b) D'après le tableau précédent, les principales rivières de la cuvette congolaise peuvent se classer dans l'ordre suivant de composition minérale, des plus riches aux plus pauvres : fleuve Congo (centre) à son entrée dans la cuvette — Aruwimi — fleuve Congo (rive) à son entrée dans la cuvette — Ubangi — Mongala amont — Itimbiri — Mongala aval.

c) La couleur réelle de ces eaux est faible ou moyenne mais les matériaux grossiers en suspension leur confèrent une turbidité généralement assez élevée. De par leur couleur réelle et leur turbidité, ces eaux présentent une couleur apparente brune assez accentuée mais qui, par son aspect laiteux, contraste nettement avec la couleur brune limpide des eaux humiques acides.

d) L'amplitude de variation des concentrations ioniques et de conductivité est de quelque 10 à 40 % de part et d'autre des moyennes indiquées.

Tableau VII. — Composition physico-chimique moyenne des cours d'eau humiques complètement neutralisés.

	pH	k _{sat}	Cr	Concentrations ioniques en µeq/l										Sk _t anal.	k _t Hum ⁻	k _t HCO ₃ + SO ₄	Sk _t
				Na	K	Ca + Mg	NH ₄	NO ₃	Cl	Hum ⁻	HCO ₃ + SO ₄						
ARUWIMI EC	7,07	49,5	49	120,1	57,0	362,5	(6)	(14)	30,8	(87)	(414)	32,5	2,8	16,9	52,2		
Banalia-Basoko	6,79	30,7	67	56,3	48,0	217,5	(6)	(14)	23,5	(115)	(175)	20,2	3,7	7,2	31,1		
ITIMBIRI EC	6,74	34,8	61	25,8	27,7	330,6	(6)	(14)	21,1	(105)	(250)	23,2	3,4	10,2	36,8		
Aketi	6,45	27,9	77	25,9	30,7	247,1	(6)	(14)	23,8	(135)	(137)	19,2	4,3	5,6	29,1		
MONGALA amont EC	6,74	30,1	45	90,9	42,4	207,5	(6)	(14)	12,0	(72)	(249)	20,1	2,3	10,2	32,6		
Abumombazi-Businga	6,89	38,5	39	63,3	34,4	329,3	(6)	(14)	19,3	(70)	(330)	25,2	2,2	13,5	40,9		
MONGALA aval EC (*)	7,30	47,0	52	113,0	42,8	350,0	4,2	19,4	37,7	(90)	(363)	30,7	2,9	14,8	48,4		
Akula- Mobeka	7,36	56,1	58	146,0	48,8	404,5	4,0	18,3	54,7	(95)	(435)	36,6	3,0	17,8	57,4		
UELE EC																	
Yakoma																	
UBANGI EC																	
Banzville-Libenge																	
Dongo-Lilanda																	
FLEUVE rive YBI																	
Yangambi																	
FLEUVE centre YBI																	
Yangambi																	

(*) Il est à noter qu'en période de crue (août à décembre), la Mongala aval présente une composition physico-chimique appauvrie qui en fait, durant cette période, une rivière partiellement neutralisée.

Variations saisonnières de la composition physico-chimique des eaux partiellement et complètement neutralisées.

On constate des variations de composition physico-chimique, en relation assez nette avec les variations du régime hydrographique des cours d'eau (et donc avec les lectures d'échelles d'étiage). Les périodes de forte crue correspondent en général, d'une part à une diminution de conductivité électrique et des concentrations ioniques, d'autre part à une augmentation de la couleur et donc de la teneur en matières humiques.

Les variations inverses s'observent au contraire aux périodes de basses eaux.

Aux points de pénétration dans la cuvette des cours d'eau étudiés, ou à leur embouchure, l'amplitude de ces variations saisonnières n'est pas énorme (10 à 40 % de part et d'autre des moyennes comme indiqué plus haut). Il est probable cependant qu'elles soient nettement plus élevées dans les tronçons amont des cours d'eau, en l'absence de l'effet stabilisateur des eaux plus pauvres de la cuvette.

Variations de la composition physico-chimique de l'amont vers l'aval des eaux humiques partiellement et complètement neutralisées.

L'apport des eaux pauvres de la cuvette entraîne évidemment une diminution de conductivité et des concentrations ioniques, au cours du trajet des rivières dans la cuvette congolaise. Parallèlement s'observe une augmentation de la couleur et donc des matières humiques. Le degré de ces variations de l'amont vers l'aval sera évidemment fonction de l'apport respectif des eaux de plateaux et des eaux de cuvette. Une rivière comme l'Aruwimi, qui pénètre dans la cuvette à une faible distance de son point d'embouchure, présentera, au cours du trajet dans la cuvette, une variation de l'amont vers l'aval nettement plus faible (10 % de la conductivité des eaux d'amont) que les rivières Mongala (50 %) ou Tshuapa (35 %), dont le parcours dans la cuvette est plus important (le cas de la Tshuapa a été traité dans le paragraphe des eaux humiques acides).

Le degré de variation sera par ailleurs d'autant plus important que la composition minérale des eaux de plateaux est plus riche,

et donc plus différente des eaux de la cuvette, ce qui explique la variation plus forte dans la Mongala que dans la Tshuapa.

*Composition cationique relative des eaux partiellement
et complètement neutralisées.*

La composition cationique relative moyenne et ses limites de variation entre les cours d'eau étudiés sont fournies dans le *tableau VIII*.

Tableau VIII. — Composition cationique relative en %.

Cations	Moyenne	Limites de variation	Composition Standard
Ca + Mg	72	61 à 86	81
Na	18	14 à 27	16
		(sauf Mongala : 8 %)	
K	10	8 à 17	3

En comparant ces données avec la composition standard de RODHE (cf GESSNER [17]), on note une composition relative assez semblable en Ca + Mg et Na, mais plus riche en K, quoique la teneur relative en cet élément soit inférieure à celle des eaux humiques acides (cette dernière étant de 25 %).

L'enrichissement relatif de K dans les eaux humiques en général doit être attribué au matériel humique d'origine végétale, constituant un élément important de la composition de ces eaux.

*Eaux du fleuve Congo dans son trajet
dans la cuvette congolaise.*

Le fleuve Congo illustre d'une manière importante la description qui vient d'être faite des différentes catégories d'eaux. Par la composition minérale moyenne de ses eaux, son cours supérieur (Lualaba), situé en dehors de la cuvette, est à ranger dans la troisième catégorie. Les quelques affluents de la rive gauche qui y déversent des eaux humiques acides, ne modifient pas sensiblement sa composition avant son point d'entrée dans la cuvette proprement dite, point qui peut être situé aux environs de Yanguambi, où le fleuve, précédemment resserré, commence à se développer considérablement en largeur. Dans la cuvette, le fleuve

reçoit par contre de nombreux affluents aux eaux humiques acides, tels que la Lulonga, l'Ikelemba et la Ruki.

En se basant sur le pH, on peut montrer que le mélange des eaux du fleuve et des affluents importants aux eaux humiques acides, se réalise beaucoup plus lentement qu'on pourrait le penser (fait également cité pour l'Amazonie par GESSNER [16]).

Alors que le pH de la Lulonga était de 4,0 en début de crue (octobre 1957), on ne notait aucune modification de ce pH dans les eaux de la rive gauche du fleuve Congo, jusqu'à 21 km en aval du confluent de cette rivière avec le fleuve. A 35 km en aval du même point, ce pH atteignait 4,2, indiquant seulement un léger mélange des eaux. La rapidité de ce mélange doit évidemment varier avec le débit de la rivière, l'angle de confluence et la disposition des îles situées en aval du confluent, ces îles créant un compartimentage peu propice à un mélange important des eaux.

Nous pouvons représenter la répartition des eaux du fleuve Congo dans son parcours dans la cuvette par la *figure 1*.

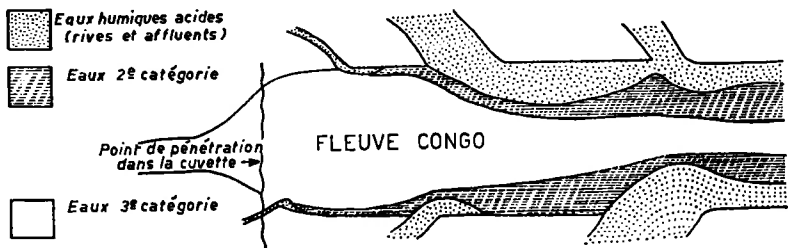


FIGURE 1. — Répartition des eaux du fleuve Congo dans son parcours dans la cuvette congolaise.

Le long des rives, se situent en aval des points d'embouchure des affluents humiques acides, des zones occupées par des eaux de la première catégorie précitée, zones dont l'importance variera avec celle de l'affluent considéré, pour s'atténuer progressivement vers l'aval, jusqu'à la rencontre d'un nouvel affluent. Au centre de la cuvette, ces zones occupées par des eaux humiques acides, forment une frange presque continue. En bordure de celle-ci, se situe une zone occupée par des eaux de la deuxième catégorie précitée, issues du mélange des eaux et dont le pH augmente au fur

et à mesure qu'on se rapproche du centre du fleuve. Ces eaux humiques partiellement neutralisées forment une bande qui s'élargit progressivement vers l'aval, avec l'apport de plus en plus important des eaux humiques acides des affluents.

Enfin, le milieu du fleuve reste occupé jusqu'au centre de la cuvette (Coquilhatville) par des eaux humiques complètement neutralisées, formant en quelque sorte un couloir qui s'insinue au milieu d'eaux humiques plus acides. Il est certain que ce couloir va en s'amenuisant vers l'aval, pour disparaître peut-être à la sortie de la cuvette (Kwamouth), ne laissant la place qu'à des eaux humiques partiellement neutralisées, appauvries par l'apport des eaux pauvres de la cuvette.

CHAPITRE II.

Relations entre la répartition actuelle de la jacinthe d'eau et la composition physico-chimique des eaux.

Deux importantes prospections ont permis d'étudier les relations entre la répartition de la jacinthe d'eau et la composition physico-chimique des eaux. Une mission I.N.É.A.C. — Service des Voies navigables, effectuée en septembre-octobre 1957 (BERG [2]) prospectait le fleuve Congo et ses affluents au centre de la cuvette congolaise. D'autre part, une vaste enquête Administration — I.N.É.A.C., recommandée par le colloque sur l'*Eichhornia crassipes* de Léopoldville (décembre 1957 [6]), a été menée de novembre 1958 à octobre 1959. Elle avait pour but de dresser une carte des pH des principales rivières situées dans les régions du Congo considérées comme menacées, à savoir les zones comprises entre les parallèles 26° Est et 7° Sud (BERG [3]).

§ 1. Résultats de la mission de 1957 sur le fleuve Congo.

I. PRÉLIMINAIRES.

Différents observateurs (DE KIMPE, MAURISSEN, KIRKPATRICK [11]) avaient signalé l'absence de la jacinthe d'eau dans les rivières « brunes » de la cuvette et leur dépérissement à certaines périodes de l'année aux confluent de ces rivières avec le fleuve. Cette observation n'avait cependant pas de valeur générale, puisque la Mongala, rivière « brune » importante, était infestée par la jacinthe sur tout son parcours navigable. Il avait dès lors été proposé d'effectuer une mission qui aurait pour but de déterminer les causes empêchant le développement de la jacinthe d'eau dans certaines rivières.

II. EAUX PROSPECTÉES.

La prospection a porté d'une part sur le tronçon du fleuve Congo situé entre le km 1 100 (100 km en amont de Mobeka, con-

fluent de la Mongala) et Coquilhatville, d'autre part sur le cours inférieur des affluents de ce même tronçon, petites rivières d'importance secondaire, telles que la Moeko, la Bondoko et la Mambembe, ou grands cours d'eau navigables, tels que la Mongala, la Lulonga, l'Ikelemba et la Ruki (voir *carte I*, p 48).

III. SITUATION D'*EICHHORNIA CRASSIPES* DANS LES EAUX PROSPECTÉES.

Les rives de toutes les îles et des bords du fleuve sont infestées par la jacinthe d'eau sur une largeur de 5 à 10 mètres, sauf en quelques points de confluent précisés plus loin. Des amas de plantes en sont arrachés et dérivent dans le cours du fleuve. Il en est de même de la Mongala, les amas dérivants y causant des ennuis à la navigation.

A l'exception de deux petites rivières infestées (stations n^{os} 56 et 42), la prospection des affluents du fleuve Congo au centre de la cuvette révèle l'absence totale de la jacinthe d'eau jusqu'à une faible distance du confluent. Aux confluent eux-mêmes, la situation est différente aux deux angles de confluence : l'angle aval, occupé uniquement par les eaux de rivière, est indemne de jacinthes, tandis que l'angle amont, souvent aigu et abritant des eaux plus calmes, est toujours envahi sur une longueur de 100 à 200 m en amont du confluent et jusqu'en bordure même du courant de la rivière, bordure occupée par des plantes fanées. En aval des confluent des rivières elles-mêmes indemnes de jacinthe, la rive du fleuve recevant l'affluent est d'abord indemne sur une distance variable, abrite plus en aval des massifs de jacinthes fanées et ensuite des massifs verts.

IV. ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES EFFECTUÉES.

Les facteurs suivants ont été mesurés : transparence — vitesse — température — oxygène dissous — pH — couleur — acidité — alcalinité — oxydabilité — conductivité électrique.

La conductivité, dont l'intérêt n'a été entrevu que plus tard, a été mesurée deux mois après les prélèvements.

Après une période aussi longue, le pH doit avoir augmenté de

Tableau IX. — Tableau général des résultats, mission 1957.

N°	Station	Présence, Absence (ou faiblesse)	Transparence (Secchi)	Coloration °HAZEN	Vitesse km/h	Température °C	pH	O ₂ dissous		Acidité cm ³ Na ₂ CO ₃ N/l	Alcalinité cm ³ H ₂ SO ₄ N/l	Oxydabilité mgO ₂ cons/l	Conductivité μ mho/cm	Catégorie d'eau
								mg/l	% sat					
20'	Fleuve, rive, Mokweti	+	0,70	125	3	28,0	6,6	5,9	72	0,20	0,17	13,9	29	2
28'	Fl. centre, Mokweti	+	0,50	40	3-4	29,3	8,1	7,2	89	0,15	0,56	10,7	63	3
40'	Fl. rive, N. Anvers	+	0,80	170	2	27,7	5,9	5,0	60	0,35	0,11	18,2	29	2
43'	Fl. centre, Km 930	+	0,70	40	3-4	—	8,1	7,2	88	0,15	0,50	6,2	63	3
54'	Fl. rive g., Lulonga	—	1,35	320	1	27,0	4,0	2,6	31	0,95	0	31,2	33	1
57'	Fl. rive g., 13 km aval Lulonga	—	—	300	4	—	4,0	—	—	—	0	29,9	—	1
58'	Fl. rive g., Km 745	+	—	270	4	27,0	4,3	3,3	39	0,80	—	27,8	21	2
65'	Fl. r. g., entre IKELEMBBA et RUKI	—	0,95	450	3	—	3,9	4,3	52	1,40	0	42,4	50	1
66'	Fl. Coquilhatville, derrière 1 ^{re} rangée d'îles	+	—	220	3	—	5,9	4,9	60	—	0,13	< 23,8	—	2
67'	Idem, derrière 2 ^e rangée d'îles	+	0,70	65	3	—	7,4	6,7	82	0,25	0,43	6,9	56	3
6'	Rivière rive Nord, Km 1 100	+	0,90	200	1	23,0	4,8	0,65	7	0,85	0	20,0	—	1
14'	MONGALA, Km 20	+	1,40	125	5	25,0	5,85	2,3	27	0,55	0,08	13,9	20	2
11'	MOEKO, Km 12	—	1,00	400	4-8	24,9	3,9	1,3	15	1,20	0	39,5	40	1
16'	Moeko confluent, bord E.C. fanés	—	—	400	3	25,0	3,9	1,3	15	1,40	0	39,5	—	1
17'	Idem, massif E. C. verts	+	—	350	0	26,0	4,8	1,5	18	1,10	0	30,9	26	2
29'	Rivière rive Nord, Km 961	—	0,50	750	1	24,4	3,8	0,65	7	1,80	0	57,9	63	1
30'	Idem, confluent, massifs EC verts	+	—	400	0	24,2	4,4	0,5	6	1,15	0	39,2	24	2

31'	BONDOKO	—	0,55	750	4	24,0	3,7	1,6	18	1,65	0	73,4	71	1
34'	MABEMBE, Km 6	—	0,70	625	6	24,3	3,8	0,65	7	1,50	0	57,8	50	1
36'	MABEMBE, confl., bord EC fanés	—	0,60	625	0	24,3	3,7	0,65	7	1,45	0	57,8	—	1
37'	Idem, massif EC verts	+	—	625	1	23,9	4,3	0,65	7	1,20	0	58,4	—	2
41'	LIKELE, Km 937	—	0,60	625	0	23,0	3,8	1,8	20	1,55	0	57,9	56	1
42'	Rivière Km 930	+	0,40	425	1	23,8	5,9	0,35	4	0,95	0,25	42,4	40	2
45'	LULONGA, Km 45	—	1,10	320	4	25,5	4,0	1,9	22	0,90	0	30,4	31	1
47'	Idem, confl., massifs EC verts	—	—	350	0	25,5	4,7	1,0	12	1,15	0	29,3	23	1
48'	Idem, confl., pleine eau	+	1,10	320	0	26,0	4,05	2,3	27	0,90	0	29,6	28	2
60'	IKELEBEA, Km 10	—	1,00	450	3	25,1	3,9	2,3	27	1,20	0	43,7	45	1
63'	RUKI, Km 6	—	0,85	220	2	27,5	4,2	4,8	58	0,90	0	24,0	24	1

en aval du confluent : stations n° 54, 57 (rive gauche recevant la Lulonga), n° 65 (rive gauche recevant l'Ikelemba).

Les relations décrites au *chapitre I* entre la conductivité, la couleur réelle, l'oxydabilité et l'acidité d'une part, le pH d'autre part, se retrouvent pour ces eaux. Ce sont d'ailleurs les résultats de cette mission qui ont permis pour la première fois de déceler les traits essentiels de classification des eaux congolaises.

2^{me} catégorie :

- Rivière du Km 930.
- Mongala.
- Confluents des rivières humiques acides occupés par des massifs d'*E. crassipes* verts : eaux de mélange rivière-fleuve.
- Eaux des rives du fleuve Congo dans la cuvette.

3^{me} catégorie :

- Eaux du centre du fleuve Congo dans la cuvette.

VI. MODES DE REPRODUCTION ET DE PROPAGATION DE L'*EICHHORNIA CRASSIPES*.

Le mode de reproduction de l'*Eichhornia crassipes* a déjà fait l'objet de nombreuses observations. En ce qui concerne le fleuve Congo, citons celles de DE KIMPE [9] qui portent notamment sur la multiplication générative et la germination. Ce mode de reproduction exige des conditions particulières (forte insolation, température élevée, faible courant d'eau, support de terre ferme ou de débris organiques formant un matelas flottant) que la plante ne trouve réunies que dans des situations assez spéciales, notamment près de l'embouchure de la Bondoko, sur sol exondé, où on observe d'ailleurs la fructification de la jacinthe d'eau. Il peut intervenir dans la recolonisation d'une région où la plante a été détruite par l'homme, à la faveur d'une période prolongée d'étiage, durant laquelle les graines trouvent sur les bancs de sable exondés les conditions de préparation à la germination qui survient dès la remontée des eaux (Yangambi, septembre 1959, plantes détruites en 1956). Ce mode de reproduction pourrait, dans la colonisation de régions nouvelles, jouer un rôle important, à la faveur d'une capacité germinative persistante de graines propagées par l'homme ou les animaux.

Dans les régions déjà infestées, sa contribution dans la propagation de la plante doit cependant être faible par rapport à la multiplication végétative, extrêmement efficace et beaucoup plus plastique vis-à-vis des conditions de milieu.

Parmi les facteurs responsables de la propagation de la jacinthe d'eau dans le bassin du Congo à partir de toyers d'infestation indéterminés, la navigation représente le principal facteur connu en ce qui concerne la propagation de l'aval vers l'amont, l'entraînement par le courant étant le facteur responsable de la propagation de l'amont vers l'aval.

Des plantes accrochées à la coque d'embarcations diverses finissent par s'en détacher, atteignent la rive et s'établissent dans des endroits où la force du courant, même d'une rivière rapide, ne se fait que faiblement sentir. Les plantes s'y multiplient alors par voie végétative et leur développement en massifs serrés entraîne par lui-même un ralentissement du courant superficiel et permet une colonisation plus ou moins continue le long des rives. La largeur des franges sera cependant limitée par la vitesse du courant qui arrache progressivement des amas de plantes et les entraîne à la dérive. Un développement en tapis continu d'*Eichhornia crassipes* n'est donc possible que dans les eaux stagnantes ou à courant très faible.

VII. ANALYSE DES CAUSES DU NON-DÉVELOPPEMENT D'*EICHHORNIA CRASSIPES* DANS CERTAINES RIVIÈRES.

A. *Peut-on incriminer le mode de propagation de la plante ?*

Comme certaines rivières restent indemnes, on pourrait se demander d'abord si le mode de propagation mentionné précédemment peut se réaliser en fait. En d'autres termes, n'est-ce pas l'absence de navigation ou une vitesse exagérée du courant le long des rives très exposées qui empêche la colonisation de ces rivières de l'aval vers l'amont ?

L'absence de navigation ne peut être mise en cause, car si certains petits chenaux non colonisés, tels que la Bondoko et la Mabembe, ne permettent qu'une navigation de pirogues offrant peu de possibilités d'accrochage pour la plante, d'autres rivières non infestées présentent une navigation intense de bateaux de gros tonnage (Lulonga, Ruki) ou de baleinières (Moeko).

La vitesse du courant ne peut être davantage incriminée car les rives ne sont jamais exposées au courant sur toute leur longueur ; elles offrent partout des gîtes d'eaux plus calmes où la jacinthe pourrait se développer. Les faits suivants confirment suffisamment cette affirmation :

a) Le fleuve est infesté le long de toutes ses rives, alors que le courant est à certains endroits supérieur à celui de rivières indemnes (6 à 7 km/h) ;

b) Par contre, des rivières importantes à courant modéré (3 km/h) comme la Ruki et l'Ikelemba sont indemnes ;

c) Si certaines petites rivières non infestées ont, en crue, au début d'octobre, des courants rapides (7 km/h), ces mêmes rivières possèdent aux périodes de décrue des courants très faibles ; c'est le cas par exemple de la Bondoko, d'après les observations effectuées par MAURISSEN au cours d'une mission sur le fleuve un mois plus tôt.

B. *Peut-on incriminer l'influence de la température ?*

Parmi les autres facteurs physiques mesurés, la température ne pourrait-elle constituer un facteur limitatif de la croissance de la jacinthe d'eau ? Il est certain que tel n'est pas le cas :

a) Cette plante colonise, aux États-Unis, des eaux de températures inférieures à celles des eaux prospectées ici ;

b) Elle prospère dans la Mongala, rivière relativement fraîche (25-26° C) et dans de petites rivières plus froides, envahies complètement (station n° 6 : 23° C) ;

c) Par contre, la Ruki (27-28° C), à température à peine inférieure à celle du fleuve, est indemne.

C. *Peut-on incriminer l'influence de la faible teneur en oxygène dissous ?*

La plupart des eaux indemnes présentent des teneurs faibles en oxygène dissous, généralement inférieures à 25 % de la saturation. Ce facteur ne peut cependant être incriminé car les stations 6 et 42 sont complètement envahies, bien qu'elles présentent des teneurs

en oxygène très faibles (7 et 4 %), alors que la Ruki, dont la teneur est normale (58 %), est indemne. Il semble que les faibles exigences en oxygène dissous soient une des nombreuses adaptations de cette plante aquatique.

D. Il est remarquable de constater que les rivières indemnes se rangent toutes dans la catégorie des eaux humiques acides de pH faible.

Par contre, les eaux des deux autres catégories présentent toutes un fort degré d'infestation. C'est ainsi que la Mongala, bien que rivière « brune », n'échappe pas à l'infestation.

Les eaux humiques acides, de pH faible, présenteraient donc des conditions impropres au développement de la jacinthe d'eau. Il est a priori difficile de distinguer, parmi les facteurs caractérisant ces eaux, celui ou ceux qui sont responsables de cette inhibition de développement. Sans préjuger de la nature du facteur en cause, on pourrait cependant, grâce à l'homogénéité de composition des eaux humiques acides, rechercher le seuil inhibiteur d'un facteur essentiel qui résume le mieux la composition globale. Les relations décrites au *chapitre I* ont montré à suffisance que le pH peut convenir dans ce but. Si les analyses effectuées permettent, comme nous le verrons, de délimiter assez précisément un seuil toxique de pH, ceci ne signifie donc pas que le pH soit lui-même le facteur en cause.

Par conséquent, le seuil trouvé ici n'est valable que dans les conditions de milieu sur lesquelles ont porté nos observations et toute interpolation à d'autres milieux serait dangereuse. L'effet spécifique du pH n'est donc pas affirmé, tout en étant cependant possible. La recherche du facteur inhibiteur fera d'ailleurs l'objet du chapitre suivant.

Distinction entre seuil inhibiteur et seuil toxique. Il est logique d'admettre qu'avant d'entraîner le dépérissement de la plante, le facteur en cause pourrait, à intensité moindre, inhiber le développement de la plante sans la faire périr. Il conviendrait dans ce cas de distinguer entre un seuil inhibiteur proprement dit et un seuil toxique. Dans le cas du pH, le seuil inhibiteur se situerait à un pH supérieur au seuil toxique. Les observations effectuées permettent la détermination aisée du seuil toxique, mais pas du seuil inhibiteur proprement dit.

Détermination du seuil toxique du pH.

1. — Une comparaison des pH des rivières importantes montre tout de suite que ce seuil doit se situer entre 4,2 (Ruki indemne) et 5,9 (Mongala).

2. — Les observations effectuées aux confluent indiquent une augmentation de pH à l'intérieur des massifs verts, par rapport à celui qui existe dans la frange de plantes fanées et qui est d'ailleurs identique à celui de l'eau libre de la rivière. Les résultats des mesures de pH de ces stations sont repris dans le *tableau X*.

Tableau X. — Résultats des mesures de pH dans la frange de plantes fanées et à l'intérieur des massifs verts.

Rivière	Plantes fanées ou eau libre (pH)	Station	Massifs verts (pH)	Station
Moeko	3,9	16	4,8	17
Rivière Km 961	3,8	29	4,4	30
Mabembe	3,7	36	4,3	37
Lulonga	4,05	48	4,7	47

On voit que le pH le plus bas, compatible avec la survivance de la jacinthe d'eau, est de 4,3 (Mabembe).

3. — En aval des confluent des rivières importantes, comme la Lulonga, l'Ikelemba et la Ruki, se situe le long de la rive du fleuve une zone de mélange de ses eaux avec celles des rivières. On doit donc s'attendre à une modification progressive des propriétés physico-chimiques de l'eau le long de la rive qui reçoit l'affluent. Quelles sont les modifications correspondantes de la végétation d'*E. crassipes* le long de cette même rive ? Des observations précises ont pu être faites à ce sujet en aval du confluent de la Lulonga avec le fleuve Congo. Il a été montré au chapitre I que le mélange des eaux s'y effectue très lentement, le pH de la Lulonga restant inchangé sur une vingtaine de km après le confluent, pour atteindre la valeur de 4,2 à 35 km du confluent. En ce qui concerne la végétation de la jacinthe d'eau, on notait au début d'octobre des signes évidents de fanaison de la plante le long de la rive gauche du fleuve jusqu'à environ 35 km en aval du confluent

(pH 4,2). Plus en aval et le long des rives opposées, à pH 4,3, *E. crassipes* présentait un aspect tout à fait normal.

De l'ensemble de ces observations, on peut conclure que le seuil de pH toxique pour *E. crassipes* est de 4,2. Dans les eaux humiques acides de pH inférieur à cette valeur, la jacinthe ne peut vivre, et dans le cas où elle a pu s'y développer durant une période où les eaux avaient un pH plus élevé, elle y périt rapidement dès que le pH redescend en-dessous de 4,2. Un seul cas de pH nettement inférieur à 4,2, à l'intérieur d'un massif vert de jacinthe, a été rencontré au confluent de la Bondoko (pH 3,9). Il est certainement dû à des variations passagères du pH à cet endroit et à sa durée d'action trop faible, facteur qui sera envisagé plus loin.

En dehors des eaux des rives du fleuve, qui peuvent présenter un pH faible, les eaux humiques partiellement neutralisées ont un pH toujours nettement plus élevé que 4,2 et généralement voisin de 6. Ces eaux sont, dans la cuvette, toujours infestées par la jacinthe d'eau : cas de la Mongala, des chenaux des îles du fleuve et de la rivière du Km 930, à pH 5,9 exceptionnellement élevé pour cette région.

Au seuil inhibiteur trouvé pour le pH, correspondent évidemment, dans la catégorie des eaux humiques acides, des seuils des autres facteurs physico-chimiques en relation directe avec le pH. Le plus pratique, concernant un facteur facilement mesurable, est le seuil de coloration : eaux indemnes aux colorations égales ou supérieures à 220° HAZEN, dans la seule catégorie des eaux humiques acides. Dans la catégorie des eaux humiques partiellement neutralisées, ce seuil n'est évidemment pas valable, une coloration de 220° HAZEN pouvant correspondre à un pH plus élevé que 4,2 (station 58 : coloration 270, pH 4,3).

VIII. INFLUENCE DES FACTEURS SECONDAIRES.

A. La lumière.

Dans les zones de pH voisins du seuil inhibiteur et spécialement en aval du confluent de la Lulonga, le long de la rive gauche du fleuve, on observe des massifs verts et fanés presque côte à côte. Il paraît certain que la lumière agit ici comme facteur secondaire car les massifs verts se trouvent surtout à l'ombre, tandis que les massifs fanés se situent généralement en pleine lumière. Ce fait

avait d'ailleurs été signalé par le rapport de mission DE KIMPE, MAURISSEN et KIRKPATRICK [11].

La lumière interviendrait donc en accentuant l'effet nocif des eaux acides et en diminuant la durée d'action nécessaire pour produire le flétrissement des plantes.

Cette influence doit cependant être considérée comme secondaire car elle n'intervient qu'aux zones de pH voisins du seuil inhibiteur. Dans aucune rivière, nous n'avons en effet pu observer des stations où la jacinthe se développait à la faveur d'une ombre persistante, dans des eaux de pH inférieur à 4,2, pas plus que le flétrissement de la plante ne peut s'observer en forte lumière, à des pH supérieurs à 4,2.

B. La durée d'action des facteurs inhibiteurs.

Dans les rivières humiques acides impropres au développement de la jacinthe, l'action continue des facteurs inhibiteurs prévient l'envahissement par la plante et l'infestation. Au contraire, aux confluent des rivières humiques acides avec le fleuve, les fortes variations de la composition physico-chimique des eaux entraînent des périodes d'infestation alternant avec des périodes de dépérissement de la jacinthe. Dans ces conditions, il est certain que le facteur en cause doit agir un certain temps avant de présenter l'effet toxique de fanaison des feuilles. Les observations effectuées aux confluent des rivières humiques acides et en aval de ceux-ci nous permettent de préciser cette durée d'action. En se basant sur les observations faites à la Lulonga par MAURISSEN, il est certain que les plantes périssent en 3 à 4 semaines sous l'effet des eaux à pH bas. Il est probable que cette durée d'action pourrait être plus courte pour des eaux plus acides (durée 12 jours citée pour les chenaux situés près de Nouvelle-Anvers, DE KIMPE [10]). Ce temps d'action variable explique également les différences progressives dans l'aspect végétatif de la jacinthe d'eau le long de la rive gauche du fleuve en aval de Lulonga, alors que le pH semble y être presque identique sur plus de 20 km.

C. Limites brusques entre les eaux du fleuve et des rivières aux confluent.

Nous avons vu que l'angle amont de confluence des rivières humiques acides était envahi sur une certaine longueur. On note

à cet endroit un saut très net du pH entre les plantes fanées de bordure et les massifs verts (voir *tableau X*). Ce saut de pH pourrait trouver deux explications plausibles :

1) Il se pourrait que les massifs serrés de jacinthes améliorent légèrement les conditions de milieu et notamment le pH, dans des eaux maintenues stagnantes par leur développement. De ce fait, ces massifs pourraient présenter une végétation normale, contrairement à des plantes isolées et de bordure, subissant un continuel lessivage par les eaux acides de la rivière.

2) Ce gradient très net des propriétés physico-chimiques pourrait correspondre à la limite de démarcation brusque et tranchée entre les eaux de la rivière et les eaux issues du mélange, rendues stagnantes par le développement de la jacinthe d'eau.

Dans ce cas, les massifs ne se développent qu'à la faveur du mélange des eaux et de l'amélioration qui en résulte, sans être eux-mêmes la cause de cette amélioration.

Or, dans la relation conductivité /pH des eaux humiques acides prospectées, les stations à *E. crassipes* aux confluent, tout comme les stations de mélange évident des eaux du fleuve et des rivières à ces confluent, constituent des points hauts de conductivité. Ces points hauts s'expliquent, comme nous l'avons vu au chapitre I par une conductivité saline supérieure à celle des eaux humiques acides, conséquence logique du mélange des eaux.

Si les massifs serrés de jacinthes parvenaient à améliorer légèrement le pH par une certaine destruction des acides humiques, leurs points de conductivité devraient par contre s'aligner le long de la courbe k/pH des eaux humiques acides et non pas se situer au-dessus de cette courbe.

Il est donc permis d'affirmer que les criques envahies par la jacinthe aux angles amont de confluence, représentent bien des stations de mélange des eaux du fleuve et des rivières et non des stations améliorées par le développement de la jacinthe en massifs serrés.

IX. DÉTERMINATION DES PÉRIODES CRITIQUES PROBABLES POUR *Eichhornia crassipes* AUX CONFLUENTS.

Nous avons décrit la situation de la jacinthe aux différents confluent et en aval de ceux-ci, telle qu'elle se présentait au début d'octobre 1957. Il est certain qu'au cours de l'année et d'une année à l'autre, cette situation doit subir des modifications profondes, en rapport avec le régime hydrographique du fleuve et des rivières, régime qui détermine la hauteur relative des eaux du fleuve et de ses affluents.

Lorsque le fleuve est en crue, ses eaux envahissent l'embouchure des rivières et y entraînent des jacinthes qui s'y développent normalement, alors que l'amont de la rivière reste indemne. C'est le cas de la Moeko et de petites rivières comme la Likele, près de Nouvelle-Anvers. Cette situation entrave d'ailleurs considérablement la navigation locale de pirogues et de baleinières. Lorsque le niveau du fleuve s'abaisse et que la rivière entre en crue, l'embouchure est occupée uniquement par les eaux humiques acides de la rivière et les plantes y périssent en quelques semaines.

En se basant sur le régime hydrographique moyen du fleuve et de la Lulonga, nous pouvons déterminer les périodes critiques probables pour *E. crassipes* aux confluent des différentes rivières prospectées. Le régime hydrographique de la Lulonga doit représenter en effet le régime moyen des rivières au cours essentiellement limité à la cuvette congolaise, à savoir la Moeko, la Bondoko, la Mabembe, la Likele, l'Ikelemba et la Lulonga elle-même. La Ruki présente par contre un régime hydrographique tout à fait semblable à celui du fleuve, ce qui laisse entrevoir peu de variations saisonnières de la hauteur relative des eaux à l'embouchure de cette rivière.

Le graphique 7 (DEVROEY [13]) compare le régime hydrographique moyen de la Lulonga à celui du fleuve. Les courbes n'indiquent que l'allure des variations des régimes hydrographiques et non les hauteurs absolues des eaux.

Ce graphique permet de déterminer de la manière suivante les périodes critiques pour *E. crassipes* au confluent de la Lulonga :

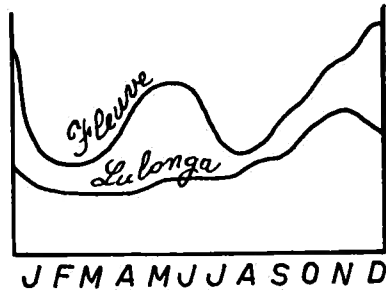
— En mai-juin, le fleuve est en crue et la Lulonga moyenne : l'embouchure de cette rivière est donc occupée par les eaux du

fleuve qui y entraînent des amas de jacinthes qui s'y développent probablement ;

— En juillet-août, le fleuve est en décrue et la Lulonga moyenne : le confluent est occupé par les eaux de la Lulonga qui le débarrassent des jacinthes d'eau ;

— En octobre, la Lulonga est en crue et le fleuve en début de crue : le confluent, indemne d'*E. crassipes*, reste donc occupé par les eaux de la Lulonga ;

— A la fin de l'année, avant que ne s'amorce leur décrue de février-mars, les eaux du fleuve et de la Lulonga sont hautes : de leur hauteur relative dépendra, durant cette période, la situation de la jacinthe au confluent.



GRAPHIQUE 7. — Régimes hydrographiques moyens Lulonga-fleuve Congo.

Cette année, au début d'octobre, le fleuve était en décrue prolongée, tandis que la Lulonga était en début de crue : la période critique pour *E. crassipes* s'est donc fortement accentuée par rapport aux années normales. Ceci explique la très forte influence des eaux de la Lulonga le long de la rive gauche du fleuve, sur une distance considérable.

§ 2. Résultats de l'enquête Administration — I. N. É. A. C.

Cette enquête comportait, d'une part la communication de renseignements concernant la végétation de la jacinthe d'eau dans les rivières prospectées par l'enquête, d'autre part le prélèvement d'échantillons d'eaux des principales rivières navigables, l'envoi de ces échantillons par avion aux laboratoires d'analyses ⁽¹⁾,

(1) I. N. É. A. C.-Yangambi pour la zone Nord (Uele-Ubangi et cuvette centrale), Institut de médecine tropicale à Léopoldville pour la zone Sud (Kasai, Lac Léopold II, Bas-Congo).

et la détermination du pH. Les périodes des 4 prélèvements répartis au cours d'une année (novembre 1958 à octobre 1959) ont été choisies en fonction du régime hydrographique de chaque rivière, de façon à correspondre aux maxima et minima de crue et décrue des différents cours d'eau.

La détermination postposée du pH dans le but particulier de l'enquête représentait une condition essentielle pour pouvoir entamer une étude d'une telle envergure ; elle était valable grâce à la bonne conservation des échantillons des eaux humiques acides et à l'influence négligeable de l'acide carbonique dissous sur le pH de ces eaux. Quant aux eaux humiques partiellement ou complètement neutralisées, la détermination de leur pH ne présentait d'intérêt qu'en vue de leur classement en dehors des eaux humiques acides et ne devait donc pas être d'une grande exactitude.

Les échantillons de la zone Nord, envoyés au laboratoire de Yangambi, ont fait l'objet d'un programme d'analyses le plus complet possible, compatible avec le volume restreint des échantillons prélevés. Ces analyses ont permis la description et la discussion de la composition physico-chimique des eaux congolaises, par comparaison avec les eaux de la région de Yangambi (voir chapitre I).

I. RÉPARTITION DE LA JACINTHE D'EAU DANS LA CUVETTE CONGOLAISE.

Nous résumons ci-dessous les différents renseignements recueillis au cours de l'enquête en ce qui concerne la répartition de la jacinthe d'eau dans le bassin du Congo.

FLEUVE CONGO : Présence, de Basoko à Léopoldville.

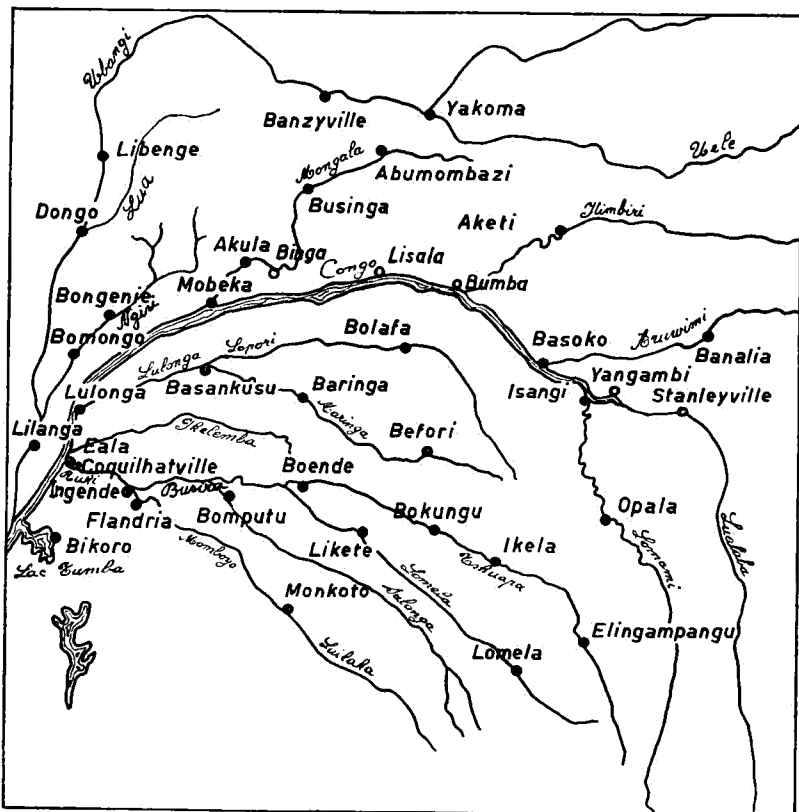
Néant de Stanleyville à Isangi, suite à la destruction complète en 1956 (deux foyers issus de germination après la décrue de juin à septembre 1959 ont été détruits en novembre 1959 dans la région de Yangambi).

LOMAMI : Néant.

ARUWIMI : Néant.

ITIMBIRI : Présence de l'embouchure à Aketi ainsi que sur quelques petits affluents de l'Itimbiri.

Néant en amont d'Aketi.



CARTE 2. — Carte de l'enquête Administration — I. N. É. A. C.

MONGALA : Présence, de l'embouchure à Binga.
Néant en amont de Binga.

BASSIN DE L'UBANGI :

UELE : Néant.

UBANGI : Présence de l'embouchure jusqu'à un point situé entre le confluent de la Lua et Libenge.
Néant en amont de ce point.

LUA : Néant.

NGIRI : Néant. Présence seulement dans les chenaux reliant l'Ubangi au cours inférieur de la Ngiri.

BASSIN DE LA LULONGA : Tout le bassin de la Lulonga compre-

nant la Lulonga, le Lopori et la Maringa, est complètement indemne d'*Eichhornia crassipes*.

IKELEMBA : Néant.

BASSIN DE LA RUKI : La Ruki, le cours inférieur de la Busira (en aval de Bokote), la Lomela, la Salonga, la Luilaka et la Momboyo sont complètement indemnes.

La Tshuapa est par contre infestée de Vieux-Wema (en aval de Bokungu) à l'embouchure, l'infestation s'étendant dans le cours supérieur de la Busira jusqu'à Bokote.

LAC TUMBA ET CHENAL D'IREBU : La fréquence des jacinthes est en rapport d'une part avec les courants induits par les crues et décrues du fleuve Congo et du lac, d'autre part avec les vents.

Destruction mécanique des jacinthes par les vagues, contre les rochers de la rive Nord-Est du lac Tumba ou par la mise à sec sur les rives. Certains plants se maintiennent dans la forêt inondée.

La jacinthe semble se maintenir dans le lac Tumba à la période de hautes eaux, à pH plus élevé (pH 4,80 en novembre).

PETITS AFFLUENTS DU FLEUVE CONGO : Présence dans les petites rivières des deux rives du Fleuve, entre Lisala et Bumba.

Présence dans la rivière Pama près de Lukolela.

Présence dans la Sangasi (situation ?). Il s'agit en fait d'un chenal du fleuve.

Affluents dans la région de Léopoldville : néant dans l'Inkisi et la Black River-Lufimi.

BAS-CONGO : Néant en dehors du fleuve Congo.

BASSIN DU KASAI :

KASAI : présence signalée dans les environs de Mushie.

Affluents du Kasai : aucun affluent n'est infesté sauf la Piopio (en territoire d'Idiofa) et la Fimi entre Nioki et Mushie. Ces foyers ont été détruits à plusieurs reprises.

Discussion.

1) La répartition actuelle de la jacinthe d'eau et les limites extrêmes atteintes par l'infestation avant la campagne de lutte (Stanleyville pour le fleuve Congo, Port-Francqui pour le Kasai)

prouvent à suffisance que la navigation a constitué le facteur essentiel de propagation de cette plante de l'aval vers l'amont.

a) La jacinthe d'eau est en effet essentiellement limitée au cours d'eau navigables (hormis le cas d'introduction directe par l'homme).

b) La jacinthe d'eau n'est jamais signalée en amont des terminus de navigation.

c) Les limites d'extension pour les deux biefs les plus importants (fleuve Congo et Kasai) coïncident exactement avec les terminus de navigation (Stanleyville et Port-Francqui).

d) Une rivière importante non navigable, comme la Lindi à Stanleyville, n'a jamais présenté d'infestation alors que la jacinthe était abondante au confluent avec le fleuve.

e) La plupart des petits affluents des cours d'eau infestés sont indemnes de jacinthe (affluents du Kasai, de l'Ubangi, de la Mongala), alors que les conditions de pH n'y sont pas inhibitrices pour la plante.

Seuls quelques affluents non navigables du fleuve Congo dans la région Lisala-Bumba, de l'Itimbiri, et la Piopio, affluent du Kasai, sont signalés comme infestés. Le fait que l'amont de ces affluents est indemne prouve que la propagation s'est faite à partir du confluent infesté, soit par le reflux des eaux lors des crues du cours d'eau principal, soit par des plants accrochés à de petites embarcations telles que pirogues et baleinières.

f) Certaines rivières importantes, comme le Lomami, l'Aruwimi, le Kwango-Kwilu, sont restées indemnes malgré l'infestation aux confluent des cours d'eau principaux. A ce sujet, il faut faire remarquer que la probabilité de transport de plantes par les embarcations sera faible si les amas dérivants de jacinthes sont rares dans la passe navigable, ce qui devait être le cas au début de l'infestation des cours d'eau principaux, avant l'exécution des mesures préventives de contrôle et de la campagne de lutte. Enfin, pour former un foyer d'infestation, un amas de plants charrié par une embarcation doit se fixer à la rive. Un courant important peut, dans certains cas, avoir empêché cette fixation.

2) Malgré la présence du facteur de propagation qu'a constitué la navigation, les grandes rivières du centre de la cuvette, Lulonga, Ikelemba, Ruki, Ngiri, sont restées indemnes à cause de la composition physico-chimique de leurs eaux.

II. COMPOSITION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX PROSPECTÉES.

Il ne sera traité ici que des eaux prélevées dans la zone Nord (Uele — Ubangi — Cuvette centrale), dont les échantillons ont été expédiés au laboratoire de la Division d'Hydrobiologie de l'I.N.É.A.C. à Yangambi.

A. Classement des rivières par catégorie d'eau.

1. Eaux humiques acides

Bassin LULONGA : LOPORI — MARINGA — LULONGA ;
 Bassin IKELEMBA : IKELEMBA ;
 Bassin RUKI : TSHUAPA (aval) — BUSIRA — RUKI ;
 LOMELA ;
 SALONGA ;
 LUILAKA — MOMBOYO ;
 NGIRI ;
 LAC TUMBA.

2. Eaux humiques partiellement neutralisées.

LOMAMI, aux périodes de hautes eaux, à pH plus faible ;
 MONGALA, aval en période de crue ;
 TSHUAPA, amont (tronçon Elingampangu — Ikela).

3. Eaux humiques complètement neutralisées.

LOMAMI, aux périodes de basses eaux, à pH plus élevé ;
 ARUWIMI ;
 ITIMBIRI ;
 MONGALA ;
 UELE — UBANGI.

B. Tableau général des résultats de pH (voir tableau XI).

Tableau XI. — Résultats de pH de l'enquête.

Catégorie	Rivière	Station	pH aux différents prélèvements			
			I	II	III	IV
1. Eaux humiques acides	LOPORI	Bolafa	4,75	5,10	—	4,70
	MARINGA	Befori	4,55	5,05	5,00	4,65
	MARINGA	Baringa	4,20	4,60	4,60	4,10
	LULONGA	Basankusu	4,05	4,30	4,40	—
	LULONGA	Lulonga	4,05	4,45	4,45	4,00
	IKELEMBA	Balangala	3,95	4,45	4,50	5,55
	IKELEMBA	Coquilhatville	3,85	3,90	3,90	3,80
	TSHUAPA	Bokungu	5,20	5,20	5,35	5,20
	TSHUAPA	Boende	4,90	5,30	5,05	4,80
	RUKI	Ingende	4,30	4,50	4,25	—
	RUKI	Eala	4,30	4,50	4,30	4,30
	LOMELA	Lomela	—	4,60	4,60	5,10
	LOMELA	Likete	4,40	4,50	4,60	4,60
	SALONGA	Bomputu	4,15	4,20	4,25	—
	LUILAKA	Monkoto	4,35	4,60	4,45	4,40
	MOMBOYO	Flandria	4,05	4,35	4,05	4,00
	NGIRI	Bongenie	4,00	4,05	4,30	—
NGIRI	Bomongo	4,10	3,95	4,40	4,10	
LAC TUMBA	Bikoro	4,80	4,30	4,50	4,50	
2. Eaux humiques partiellement neutralisées	LOMAMI	Opala	6,45	6,55	6,55	6,85
	LOMAMI	Isangi	6,40	6,70	6,60	6,80
	TSHUAPA	Elingampangu	5,80	6,20	6,10	6,50
	TSHUAPA	Ikela	5,00	—	5,45	6,05
3. Eaux humiques complètement neutralisées	ARUWIMI	Banalia	6,85	7,40	7,15	6,95
	ARUWIMI	Basoko	6,80	7,15	7,10	7,15
	ITIMBIRI	Aketi	6,50	6,90	6,80	6,95
	MONGALA (EBOLA)	Abumombazi	6,70	6,50	6,60	6,90
	MONGALA	Businga	6,80	6,85	6,80	6,75
	MONGALA	Akula	6,35	6,60	6,50	6,35
	MONGALA	Mobeka	6,45	6,65	6,50	6,20
	UELE	Yakoma	6,60	7,05	6,65	6,65
	UBANGI	Banzyville	6,80	7,20	6,65	6,70
	UBANGI	Libenge	6,80	7,35	7,00	6,80
	UBANGI	Dongo	6,75	7,40	—	6,90
UBANGI	Lilanga	6,90	—	6,85	6,50	

III. SEUILS DE pH TOXIQUE ET INHIBITEUR DU DÉVELOPPEMENT DE LA JACINTHE D'EAU DANS LES EAUX HUMIQUES ACIDES.

Le paragraphe précédent a établi l'existence d'un seuil toxique pour la jacinthe, dans les eaux humiques acides, à un pH de 4,2. Il est plausible d'admettre par ailleurs l'existence d'une zone de pH, au-dessus de 4,2, qui tout en n'entraînant pas de dépérissement brusque de la plante, en inhibe le développement. Dans cette zone inhibitrice, la plante pourrait évidemment survivre, mais ne présenterait plus de capacité d'envahissement.

1. Les résultats de cette enquête permettent-ils de confirmer l'existence d'une telle zone inhibitrice ?

Pour répondre à cette question, il faudrait considérer des cours d'eau navigables, indemnes de jacinthe malgré un pH supérieur à 4,2, tout en étant en contact direct avec le fleuve infesté de manière à rendre possible l'existence du facteur de propagation par la navigation. Tel n'est pas le cas par exemple des rivières Lopori et Maringa dans le bassin de la Lulonga : la barrière d'eaux toxiques que constitue la Lulonga empêche vraisemblablement la possibilité d'une propagation directe à partir du fleuve Congo jusqu'en amont.

Dès lors, la rivière Ruki peut seule remplir les conditions exigées : en contact direct avec le fleuve Congo, elle est indemne de jacinthe malgré un pH supérieur à 4,2 (4,30 — 4,50). La zone de pH 4,2-4,5 constituerait donc une zone inhibitrice pour le développement de la jacinthe d'eau, tout en n'étant pas toxique.

2. Des essais réalisés en laboratoire et dont il sera question au chapitre suivant semblent indiquer que le pH 4,4 ne soit pas inhibiteur dans les conditions expérimentales utilisées. Comme il sera dit plus loin, il y a cependant lieu d'interpréter avec réserve les résultats obtenus en bacs d'essai. Dès lors, il nous paraît raisonnable et prudent de ne considérer comme zone inhibitrice certaine que la zone de pH 4,2-4,3, et de considérer la zone 4,3-4,5 comme douteuse.

Dans les limites de pH 3,5 à 5,2 des eaux humiques acides, nous considérons par conséquent 4 zones distinctes :

- a) 3,5 à 4,2 : zone toxique ;
- b) 4,2 à 4,3 : zone inhibitrice ;
- c) 4,3 à 4,5 : zone douteuse ;
- d) 4,5 à 5,2 : zone non inhibitrice.

IV. CLASSIFICATION DES DIFFÉRENTS COURS D'EAU QUANT A LA POSSIBILITÉ ÉVENTUELLE D'ENVAHISSEMENT PAR LA JACINTHE D'EAU.

L'enquête ayant déterminé les variations extrêmes probables du pH pour les cours d'eau prospectés, nous pouvons formuler les critères suivants concernant la possibilité éventuelle d'envahissement par la jacinthe d'eau :

1. — Si le pH reste constamment inférieur à 4,3, la rivière est à considérer comme non envahissable ;

2. — Si le pH est en général inférieur à 4,3 mais dépasse légèrement cette valeur pour un seul ou pour deux prélèvements, la rivière peut également être considérée comme non envahissable ;

3. — Si le pH oscille dans la zone douteuse 4,3 à 4,5, ou entre les zones extrêmes, la rivière est à considérer comme douteuse quant à la possibilité d'envahissement ;

4. — Si le pH est constamment égal ou supérieur à 4,5, la rivière doit être considérée comme certainement envahissable.

Les *graphiques* 8, 9 et 10 fournissent les variations extrêmes probables du pH des rivières humiques acides. Quant aux rivières humiques partiellement ou complètement neutralisées, la possibilité d'infestation est évidente, sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours au pH.

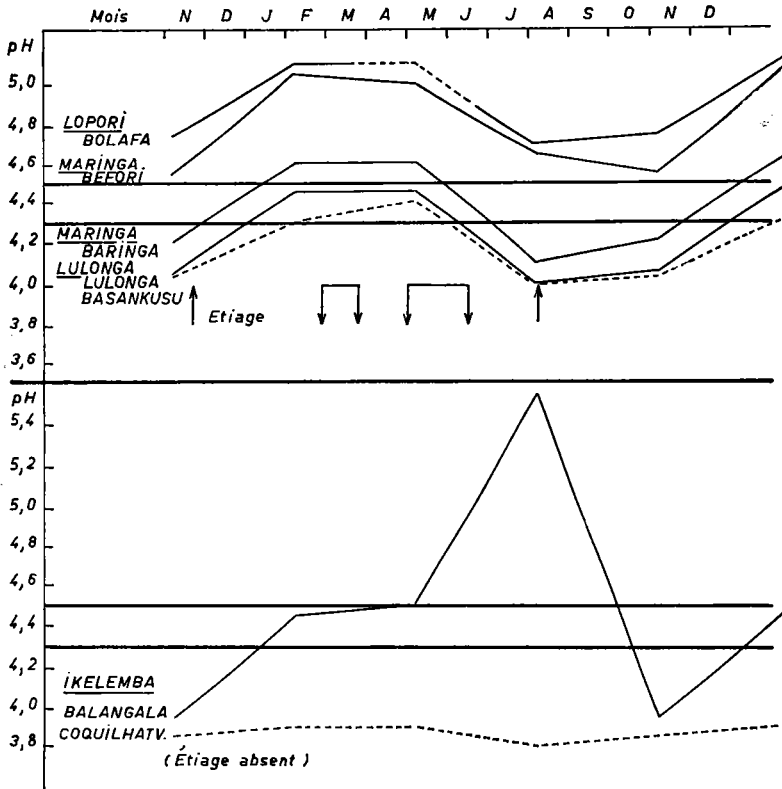
L'examen de ces graphiques, suivant les critères précédents, permet la classification suivante :

A. Cours d'eau non envahissables :

MARINGA, de Baringa à l'embouchure ;

LULONGA, sur tout son parcours ;

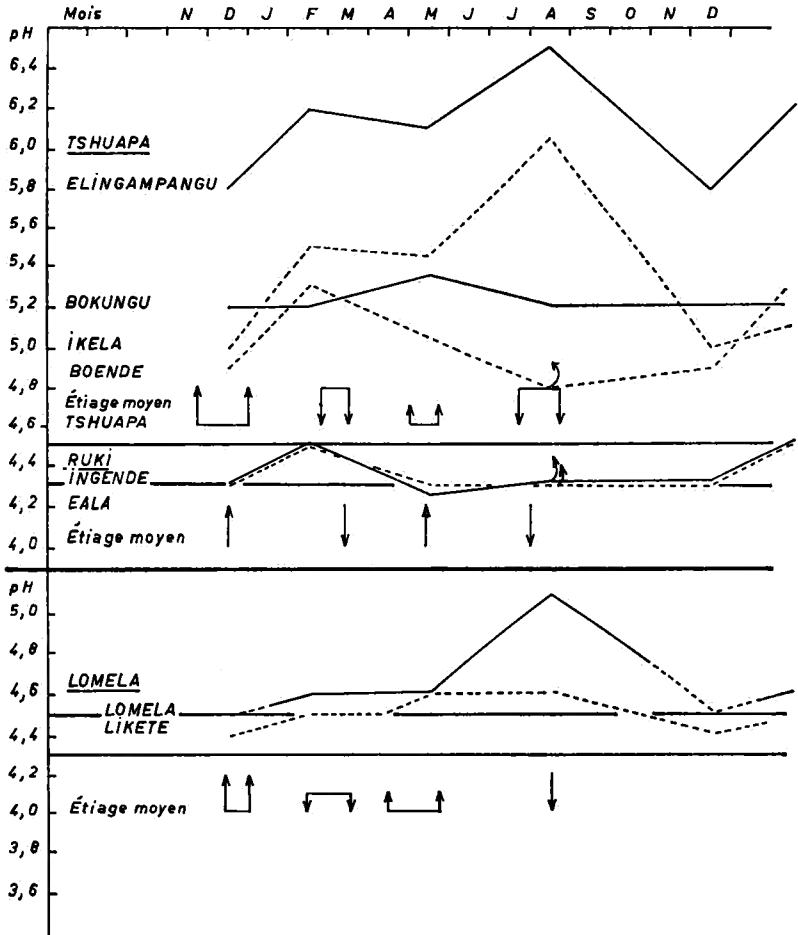
IKELEMBIA, sur tout son parcours (le pH 5,55 en avril pour



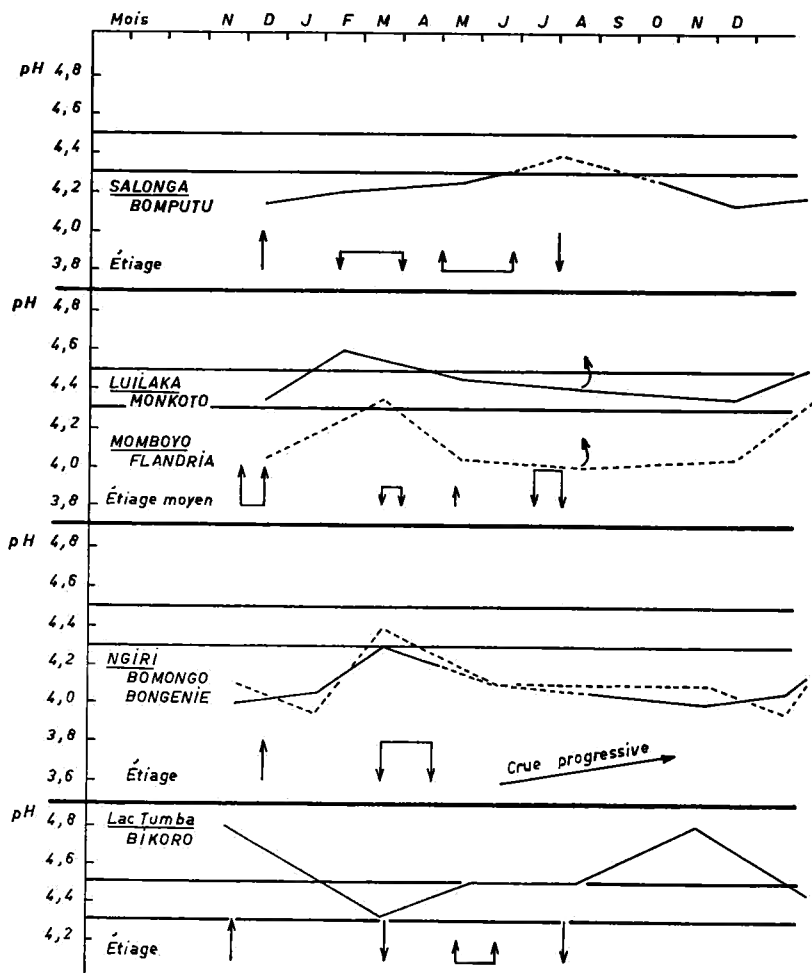
LÉGENDE

- ↑ ↑ Maximum de grande ou de petite crue
- ↓ ↓ Minimum de grande ou de petite décrue
- ⌋ pH à corriger en fonction de l'étiage

GRAPHIQUE 8. — Variations extrêmes probables du pH.



GRAPHIQUE 9. — Variations extrêmes probables du pH.



GRAPHIQUE 10. — Variations extrêmes probables du pH.

l'Ikelemba à Balangala est certainement extraordinaire et dû à des conditions de décrue exceptionnellement accentuées) ;

RUKI, sur tout son parcours ;

MOMBOYO, de Flandria à l'embouchure ;

SALONGA, de Bomputu à l'embouchure ;

NGIRI, de Bongenie à l'embouchure.

B. Cours d'eau douteux :

LOMELA, à Likete ;

LUILAKA, à Monkoto ;

LAC TUMBA.

C. Cours d'eau envahissables :

LOPORI, à Bolafa ;

MARINGA, à Befori ;

TSHUAPA, d'Elingampangu à Boende ;

LOMELA, à Lomela.

Discussion de cette classification.

1) Les résultats ne concernent que 4 prélèvements répartis dans le courant d'une année. On pourrait objecter que les courbes de variation du pH obtenues par ces 4 points n'englobent pas nécessairement les variations extrêmes rencontrées dans l'année. Il est cependant probable qu'il en soit ainsi, étant donné le choix des époques de prélèvement correspondant aux périodes théoriques de crue et d'étiage. Comme il a été vu au chapitre I, on note une diminution de pH et donc une acidification aux périodes de crue, une augmentation de pH aux périodes de décrue. Il faut rappeler que le lac Tumba présente, en fonction des hautes et basses eaux, des variations de pH inverses de celles que l'on rencontre dans les rivières : pH plus acide aux basses eaux, moins acides aux hautes eaux.

Les lectures des échelles d'étiage des différents cours d'eau prospectés par l'enquête, nous permettent d'indiquer les périodes effectives de crue et d'étiage (voir *graphiques 8, 9 et 10*). On voit que ces périodes ont en général correspondu avec les époques de prélèvement. Pour quelques points seulement, l'étiage est apparu quelque temps avant le prélèvement : dans ces conditions,

l'échantillon prélevé à la remontée des eaux doit avoir présenté un pH plus faible qu'à la période d'étiage. Pour cette raison, ces points à pH sous-estimé sont indiqués sur les graphiques comme devant être légèrement remontés (↑).

2) Les résultats ne concernent que quelques stations choisies sur les différentes rivières navigables entre le terminus de navigation et l'embouchure. Si ce choix tendait à inclure entre les stations de prélèvement la plus grande longueur possible du cours d'eau, il restait cependant limité par la possibilité de présence d'un récolteur et par l'existence d'une échelle d'étiage. Il serait par conséquent utile de pouvoir estimer les valeurs de pH sur les tronçons non inclus entre les stations choisies, qu'il s'agisse de l'amont de la rivière, éventuellement non navigable, ou de l'aval de la rivière, entre la dernière station de prélèvement et l'embouchure (par exemple pour la Salonga entre Bomputu et l'embouchure, pour la Tshuapa entre Boende et le point de confluence avec la Salonga).

Au chapitre I, on a mis en évidence, pour les rivières humiques acides de la cuvette, une diminution progressive de pH de l'amont vers l'aval par l'acidification due aux matières humiques solubilisées dans les régions marécageuses de la cuvette.

On peut donc s'attendre à trouver une valeur de pH moins acide à l'amont de la première station de prélèvement et une valeur de pH plus acide au contraire en aval de la seconde station de prélèvement des différentes rivières. Par exemple, la LOMELA en amont de Lomela présenterait une valeur du pH supérieure à celle que l'on a mesurée à Lomela, et à l'aval de Likete, une valeur inférieure à celle qui fut observée dans cette dernière station.

Cette variation régulière du pH, de l'amont vers l'aval, nous indique tout de suite que les tronçons amont des différentes rivières humiques acides sont les plus susceptibles d'être envahis par la jacinthe d'eau. Il est certain que, pour toutes les rivières prospectées de cette catégorie, les tronçons situés en amont des terminus de navigation présentent des pH nettement supérieurs au seuil inhibiteur. L'absence de navigation comme facteur de propagation, empêchera sans doute l'envahissement de ces tronçons parfois importants. Par contre, l'amont des tronçons navigables de toutes les rivières humiques acides (excepté peut-être

l'Ikelemba) est également envahissable ou « douteux ». Parmi ceux-ci, la Tshuapa constitue le plus important, infesté d'ailleurs dès 1956 à partir de Coquilhatville, avant que des mesures de contrôle efficace n'aient pu être prises.

3) Le point précédent permet de fournir les précisions suivantes quant aux tronçons envahissables et douteux.

a) *Envahissables* :

LOPORI de Bolafa en amont à un point indéterminé en aval ;

MARINGA de Befori en amont à un point situé entre Befori et Baringa en aval ;

TSHUAPA d'Elingampangu en amont jusqu'à l'embouchure ;

LOMELA de Lomela en amont jusqu'au voisinage de Likete en aval ;

b) *Douteux* :

LOMELA au voisinage de Likete (probablement non envahissable en aval jusqu'à l'embouchure) ;

SALONGA en amont de Watsi-Kengo (d'après les prélèvements effectués par la mission botanique de l'I.N.É.A.C. dans la Tshuapa en août 1958) ;

LUILAKA au voisinage de Monkoto (probablement non envahissable en aval jusqu'au confluent avec la Loile) ;

LAC TUMBA.

Citons enfin qu'entre Boende (Tshuapa envahissable) et Ingende (cours supérieur de la RUKI non envahissable), s'étend la BUSIRA dont l'amont est certainement infestable. Si l'on ne dispose malheureusement d'aucune station de prélèvement entre ces deux postes, la limite aval d'infestation signalée sur ce tronçon à Bokote sur la BUSIRA permet évidemment de considérer comme envahissable non seulement la *TSHUAPA dans son entièreté* mais également la *BUSIRA en amont de Bokote*.

V. FACTEURS EXPLIQUANT LA RÉPARTITION ACTUELLE DE LA JACINTHE D'EAU DANS LE BASSIN CONGOLAIS.

De par leur situation géographique comparable, l'Amazonie, foyer d'origine de la jacinthe d'eau en Amérique du Sud, et la

cuvette centrale congolaise présentent des conditions climatiques semblables, de régime équatorial. Il était donc plausible d'admettre que l'introduction de la plante en Afrique équatoriale puisse entraîner une colonisation aisée du nouveau milieu aquatique, si la plante trouvait par ailleurs des eaux de composition physico-chimique adéquate et des conditions de propagation propices.

Le chapitre suivant montre que les exigences minérales de la jacinthe sont faibles, en conditions de pH peu acide ou neutre, et que sa croissance en eaux humiques acides peut être très vigoureuse si l'eau est constamment renouvelée. La composition physico-chimique des eaux du fleuve Congo, beaucoup plus riche que celle des rivières humiques acides, devait par conséquent constituer un milieu favorable au développement d'*Eichhornia crassipes*. Il resterait cependant à expliquer le degré d'infestation beaucoup plus prononcé qu'a présenté la plante dès son introduction dans le bassin congolais, par rapport à celui qu'elle semble maintenir dans son foyer d'origine ; présence d'un ennemi naturel, composition des eaux, régime hydrographique seraient à considérer pour tenter d'expliquer cette différence.

L'introduction de la jacinthe d'eau au Congo paraît déjà ancienne, puisqu'elle a été observée au Katanga en 1910 ; elle était par ailleurs connue dans des jardins de Léopoldville en 1951 et à Eala en 1954 [28]. Il est permis de penser qu'un foyer situé sur le fleuve Congo ait été à l'origine de l'infestation. Une plante ou un fragment de rhizome pourvu de ses bourgeons, jeté au fleuve, pourrait avoir constitué le foyer d'origine de l'infestation, propagé avec facilité par la navigation intense du fleuve Congo.

Dès lors, la répartition actuelle de la jacinthe d'eau dans le bassin congolais peut s'expliquer par les quatre facteurs suivants :

1) Propagation par la navigation de l'aval vers l'amont, à partir du foyer d'origine.

2) Propagation à partir de ce même foyer, de l'amont vers l'aval par le courant.

Ces deux facteurs ont entraîné évidemment la propagation de proche en proche de la plante.

3) Inhibition de la jacinthe dans les eaux humiques acides de pH inférieur ou égal à 4,3.

4) Destruction artificielle par l'homme.

Reprenons point par point la répartition actuelle de la jacinthe d'eau telle que décrite plus haut, en essayant de l'expliquer au moyen des quatre facteurs indiqués.

Fleuve Congo. — Infesté sur tout le bief navigable Léopoldville-Stanleyville en 1955, la campagne de destruction chimique (au 2-4 D) a entraîné son élimination complète du tronçon Stanleyville-Isangi. La réussite totale de la campagne de destruction sur ce tronçon est due à la conformation simple du fleuve dans son trajet en dehors de la cuvette proprement dite (largeur faible, rives non inondées, absence d'îles), rendant possible une destruction efficace et définitive. Dans la cuvette, au contraire, où le fleuve est parsemé d'îles et s'étale en largeur, l'énorme longueur des rives à traiter, la présence de chenaux impénétrables, rendent pratiquement impossible une destruction complète de la plante.

Lomami. — L'absence de propagation par la navigation est cause de la non-infestation. Ce point a été discuté plus haut.

Aruwimi. — Idem. La navigation peu importante sur cette rivière a contribué sans doute à l'absence de propagation de la jacinthe.

Itimbiri. — Par la navigation importante qui la parcourt et par la composition physico-chimique de ses eaux, cette rivière devait être rapidement infestée. Elle le fut dès le début de l'infestation massive du fleuve en 1955. La campagne de destruction a fait régresser la jacinthe sans la faire disparaître complètement.

Mongala. — Mêmes conclusions que pour l'Itimbiri.

Bassin de l'Ubangi.

Uele. — L'absence de navigation sur le cours supérieur de l'Ubangi a empêché l'infestation de cette rivière.

Ubangi. — L'infestation à partir du confluent avec le fleuve Congo a rapidement atteint les environs de Libenge, terminus de navigation du côté du Congo. Les opérations de destruction entreprises sur les deux rives ont cependant limité l'infestation massive au cours inférieur de l'Ubangi.

Lua. — Faible navigation. Mêmes conclusions que pour le Lomami et l'Aruwimi.

Ngiri. — Eaux humiques acides empêchant le développement de la jacinthe.

Bassin de la Lulonga.

Lopori et cours supérieur de la Maringa. — La barrière d'eaux toxiques que constitue la Lulonga a rendu impossible la propagation directe à partir du fleuve Congo. La composition physico-chimique de ces eaux n'est cependant pas de nature à inhiber le développement de la jacinthe, si la plante venait à y être propagée.

Cours inférieur de la Maringa et Lulonga. — Eaux humiques acides empêchant le développement de la jacinthe.

Ikelemba. — Idem.

Bassin de la Ruki.

Tshuapa. — Comme il a été dit au chapitre I, l'origine de la Tshuapa aux confins de la cuvette congolaise, est responsable de la composition minérale plus riche de ses eaux par rapport à celle des rivières limitées à la cuvette proprement dite. Le pH de la Ruki, plus élevé que celui de la Lulonga, est dû pour une bonne part à la faible acidité des eaux de la Tshuapa. Aussi avons-nous vu que la composition physico-chimique des eaux de la Ruki est seulement inhibitrice du développement d'*Eichhornia crassipes* et non toxique pour cette plante. De ce fait, cette rivière n'a pas constitué, comme la Lulonga, une barrière à l'envahissement des affluents d'amont. Aussi la Tshuapa s'est-elle trouvée assez rapidement infestée. L'infestation n'a cependant pas atteint le cours supérieur de cette rivière (Bokungu-Ikela), probablement grâce aux mesures de contrôle prises dès l'apparition de la jacinthe.

Cours supérieur de la Busira (jusqu'à Bokote). — Mêmes conclusions que pour la Tshuapa.

Cours inférieur de la Busira (de Bokote à l'embouchure) et Ruki. Eaux humiques acides inhibitrices du développement d'*E. crassipes*.

Lomela. — La navigation moins importante que sur la Tshuapa, ainsi que le tronçon aval aux eaux très acides, de cette rivière, ont

probablement empêché la propagation de la plante vers l'amont, dont les eaux ne sont pas inhibitrices.

Salonga. — Mêmes conclusions que pour la Lomela.

Lwilaka. — Idem.

Momboyo. — Eaux humiques acides empêchant le développement de la jacinthe. Pour le cours supérieur, mêmes conclusions que pour la Lomela.

Lac Tumba.

D'une part, la pénétration des jacinthes par le chenal d'Irebu, d'autre part, leur destruction mécanique contre les rochers de la rive Nord-Est et leur inhibition aux périodes de bas pH (4,3), expliquent les fluctuations observées dans l'infestation limitée du lac Tumba.

CHAPITRE III.

Étude expérimentale de l'influence écologique des eaux humiques acides sur *Eichhornia crassipes*.

Introduction — But des essais.

Après les observations réalisées dans la nature et dont il a été question dans le chapitre précédent, des essais ont été entrepris en laboratoire, dans le but, d'une part, de déterminer le facteur responsable de l'inhibition de la jacinthe d'eau dans les rivières humiques acides de bas pH, d'autre part de préciser le seuil de pH inhibiteur dans ces eaux.

Comme le suggère un travail déjà ancien [26], la concentration en ions H pourrait à elle seule expliquer l'inhibition du développement de la plante dans les eaux acides. Aussi les essais ont-ils été entrepris sur la base de cette hypothèse.

En ce qui concerne le seuil de pH inhibiteur, il convenait de tenter de vérifier expérimentalement et de compléter les conclusions issues des observations réalisées dans la nature.

§ 1. Dispositif expérimental.

Deux essais ont été répétés dans le temps, chacun comportant une période de six semaines.

I. TRAITEMENTS.

But I. Détermination du facteur inhibiteur.

Pour vérifier l'effet éventuel de la concentration en H⁺, quatre traitements ont été envisagés :

1. pH ≥ 5 « *naturel* » : eau naturelle non inhibitrice, eau du fleuve Congo (pH 7) ou eau d'une rivière humique acide de pH 5.

2. pH 4 « *artificiel* » : même eau, portée à pH 4 par addition d'une faible quantité de H_2SO_4 .

3. pH 4 « *naturel* » : eau humique acide de pH 4.

4. pH ≥ 5 « *artificiel* » : même eau qu'en 3, neutralisée jusqu'au même pH qu'en 1, au moyen de NaOH.

But 2. Détermination du seuil inhibiteur.

Six traitements sont envisagés, avec des eaux humiques acides :

a) pH 4 : même traitement que 3.

b) pH 4,2 ; c) pH 4,4 ; d) pH 4,6 ; e) pH 4,8 ; f) pH 5,0.

II. CONDITIONS EXPÉRIMENTALES.

A. Les divers traitements sont réalisés dans des bacs en éternit de 67 litres de capacité réelle (longueur 50 cm., largeur 35, hauteur 50). Pour empêcher l'action alcalinisante des parois en éternit, des sacs étanches de plastic (polyéthylène) recouvrent les parois internes des bacs.

B. Les bacs sont disposés en deux rangées parallèles, sur une pelouse proche des laboratoires. Une toile moustiquaire protège les plants par forte insolation.

C. L'eau nécessaire aux essais est prélevée dans trois cours d'eau : le fleuve Congo à Yangambi, et les rivières Bohamba (BO) et Isalowe (IS), rivières humiques acides de pH respectivement voisins de 3,8 et 5,0. Les pH expérimentaux sont obtenus par mélange des eaux des deux rivières, suivant les quantités approximatives suivantes (en litres) :

pH 4	: 25 IS + 42 BO ;
pH 4,2	: 38 IS + 29 BO ;
pH 4,4	: 47 IS + 20 BO ;
pH 4,6	: 55 IS + 12 BO ;
pH 4,8	: 58 IS + 9 BO ;
pH 5,0	: 60 IS + 7 BO.

La description des eaux humiques acides effectuée au chapitre I montre qu'un tel mélange reproduit pratiquement la composition physico-chimique des eaux naturelles de pH expérimentaux.

Les pH « artificiels » sont obtenus par addition de H_2SO_4 ou NaOH N, suivant titrage préliminaire effectué en laboratoire. Les quantités approximatives utilisées sont les suivantes :

— pH 7 « artificiel » : 25 cm³ NaOH N, ajoutés à 67 l d'eau humique acide de pH 4 ; $[Na] = \pm 0,400$ mequ/l ;

— pH 5 « artificiel » : 10 cm³ Na OH N, ajoutés à 67 l d'eau humique acide de pH 4 ; $[Na] = \pm 0,150$ mequ/l ;

— pH 4 « artificiel » : 25 à 30 cm³ $H_2 SO_4$ N, ajoutés à l'eau du fleuve Congo ; $[SO_4] = 0,400$ à $0,450$ mequ/l, ou 9 cm³ H_2SO_4 N, ajoutés à une eau humique acide de pH 5 ; $[SO_4] = 0,130$ mequ/l.

D. Conditions diverses.

a) Une pompe à air crée dans les bacs une circulation d'eau analogue à celle d'une eau courante, et propice à l'oxygénation.

b) L'eau des bacs est renouvelée complètement tous les deux jours (1^{er} essai) et tous les trois jours (2^e essai).

c) Le pH est mesuré journallement. Au cours du 1^{er} essai, il est réajusté, si nécessaire, par addition d'une quantité déterminée d'eau humique acide, de pH voisin de 3,8. Il n'a pas été procédé à ce réajustement au cours du 2^e essai, afin de ne pas trop augmenter la teneur en matières humiques par rapport au pH.

d) Pour remédier à l'appauvrissement de l'eau des bacs, provoqué par le développement des plants, une solution nutritive a été ajoutée au cours du 2^e essai. Les ions K, Mg, NO_3 , PO_4 , ont été apportés sous forme de KNO_3 , $MgSO_4$ et KH_2PO_4 , en des quantités telles que la concentration moyenne de ces ions au cours de la période de 3 jours entre les renouvellements, ne puisse dépasser notablement leur concentration en rivière humique acide. Ces apports journaliers ont été les suivants, en mg/l :

K	0,2 ;
N- NO_3	0,07 ;
Mg	0,08 ;
S- SO_4	0,1 ;
P	0,005 .

E. Périodes des essais.

Les deux essais ont été réalisés au cours des trois derniers mois de 1959, période de l'année la plus pluvieuse et la moins ensoleillée :

1^{er} essai : du 2/10 au 9/11/1959 ;

2^e essai : du 10/11 au 23/12/1959.

Les températures de l'eau des bacs se sont situées vers le milieu de la journée à 28-30° C et ont rarement atteint 31° C.

F. Plants.

Les plants ont été récoltés dans un étang du centre piscicole de l'I.N.É.A.C. à Yaekama, en eau humique acide de pH voisin de 5. Ils ont été choisis petits, les plus homogènes possible, avec une rosette de 8 à 10 feuilles (de 15 à 20 cm² de surface foliaire pour les plus jeunes, soit 4 à 5 cm pour les dimensions des diamètres de l'ellipse) et une touffe de racines courtes (12 à 20 cm de longueur). Après leur récolte et avant le début des essais, ils ont été maintenus quelques jours dans les bacs expérimentaux, alimentés en eau de robinet.

Pour le 1^{er} essai, les plants destinés aux traitements à pH faible ont été amenés à ces pH par diminution progressive de 0,2 unité par jour. Pour le 2^e essai, les plants ont été portés immédiatement au pH définitif.

Mesures de croissance des plants.

Au cours du 1^{er} essai, le poids des plants (après 12 agitations pour éliminer l'eau des racines), ainsi que la surface foliaire ont été déterminés chaque semaine. La surface foliaire a été calculée en l'assimilant à la surface d'une ellipse, $S = \pi Rr$, qui, d'après un contrôle effectué, correspond pratiquement à la surface réelle. Les parties de feuilles fanées sont déduites de la surface foliaire en tenant compte de 4 degrés de fanaison des feuilles. Pour les mesures de poids, les feuilles complètement fanées ont été préalablement enlevées.

Dans le 2^e essai, le poids des plants n'a été mesuré qu'en début et en fin d'essai, afin de réduire les manipulations qui s'avèrent nuisibles au développement.

Les quelques stolons apparaissant au cours du 1^{er} essai ont été enlevés. Ils ont par contre été maintenus au cours du 2^e essai, mais leur nombre a été faible.

§ 2. Aspect végétatif des plants au cours des essais.

La numérotation des feuilles a permis d'établir que leurs dimensions définitives sont atteintes dès leur sortie du bourgeon foliaire. La surface foliaire totale d'un plant est conditionnée, d'une part, par la fanaison normale qui touche les feuilles vieilles en périphérie de la rosette, d'autre part, par la production de nouvelles feuilles au centre de la rosette. Si le développement est normal, il y a augmentation de la surface des feuilles, des plus vieilles aux plus jeunes, et donc une augmentation de la surface foliaire totale.

En conditions toxiques pour la jacinthe d'eau (pH 3,5 à 4,2 des eaux humiques acides), on note une fanaison prématurée des feuilles vieilles, s'étendant de la bordure de la feuille vers le centre plus rapidement qu'en fanaison normale. La feuille fanée dans ces conditions acquiert une couleur brun foncé alors qu'en fanaison normale, la couleur est jaune-brun clair. L'effet toxique se manifeste déjà 4-5 jours après le début du traitement et est plus accentué à pH 4 qu'à pH 4,2. Le port des plants est également différent : érigé en conditions normales, il devient rabattu en conditions toxiques, la rosette de feuilles s'aplatissant vers l'extérieur.

Une floraison s'observe seulement en début d'essai, à raison de 1 à 3 fleurs par plant. Le développement des plants en conditions expérimentales de pH 4,8, comparé à celui d'un même échantillon de départ, laissé durant la même période en eau courante de composition physico-chimique identique, indique clairement une insuffisance de développement en conditions expérimentales : les feuilles les plus jeunes y présentent une surface plus petite que les feuilles anciennes, entraînant de ce fait une diminution dans le temps de la surface foliaire totale ; par ailleurs, les feuilles adultes acquièrent dans la plupart des traitements une teinte vert-gris au lieu de conserver leur teinte vert-franc initiale. Par contre, la longueur des racines est, en conditions expérimentales de pH 4,8, deux ou trois fois plus grande qu'en eau courante de même pH moyen.

Le mauvais développement foliaire observé en conditions expérimentales non inhibitrices, a été attribué au cours du 1^{er} essai aux manipulations excessives des plants. En réduisant ces manipulations au minimum dans le 2^e essai, les mêmes symptômes de déficience s'observent cependant dans le développement foliaire. Des analyses physico-chimiques effectuées indiquent un appauvrissement sensible en éléments minéraux dans les bacs d'essai, fait logique étant donné le pompage important par les plantes, des éléments minéraux dans une eau très pauvre. Il était dès lors permis d'incriminer une carence minérale en conditions expérimentales, malgré le renouvellement fréquent de l'eau.

L'addition aux bacs d'une solution nutritive contenant K, Mg, N et P (voir ci-dessus) a de fait contribué à assurer aux plants une meilleure croissance au cours du 2^e essai par rapport au 1^{er}, mais les symptômes mentionnés dans le développement foliaire ont subsisté (surface foliaire en fin d'essai 84 % dans le traitement à pH 4,8, contre 231 % dans le contrôle en eau courante).

En se basant sur les résultats analytiques des teneurs minérales des divers organes des plantes en fin d'essai, il est possible de calculer approximativement les quantités des différents éléments analysés, qui ont été absorbées et accumulées par les plantes dans les conditions de développement normal en eau courante. En comparant ces quantités avec celles qui ont été apportées par la solution nutritive (voir *tableau XII*), on peut déterminer si cet apport a été suffisant ou si la plante a dû recourir aux réserves minérales de l'eau elle-même. Dans ce dernier cas, une carence minérale doit se faire rapidement sentir, étant donné la pauvreté des eaux humiques acides d'une part, et d'autre part, l'existence d'un seuil de concentrations minérales en-dessous duquel tout pompage par la plante devient impossible.

On voit que les besoins des plantes en Ca, K, Na, N et P n'ont pas été couverts par la solution nutritive. Si les teneurs minérales de l'eau naturelle semblent suffisantes pour assurer les besoins en Ca et Na (3^e colonne), il n'en est pas de même pour les autres éléments (K, N, P). Une carence relative en ces éléments semble donc avoir été la cause d'un développement insuffisant des plants dans les bacs expérimentaux. Ce phénomène de carence par épuisement minéral de l'eau n'intervient évidemment pas en eau courante où il y a un renouvellement continu de l'eau.

Tableau XII. — Quantités des différents éléments analysés qui ont été absorbées par les plantes dans les conditions de développement normal en eau courante. (*)

	mg absorbés et accumulés par jour par 12 plants en eau courante	mg apportés par jour par la solution nutritive	mg présents dans l'eau naturelle
Ca	4,6	0	39
Mg	9,2	10	12
K	71	26	80
Na	1,8	0	45
N	45,6	9,4	34
P	2,20	0,67	2,68
S	± 2	13,4	75

A cause du développement foliaire anormal, l'interprétation quantitative des résultats des traitements n'est plus guère possible. L'interprétation qualitative permet cependant, comme nous le verrons, de formuler des conclusions particulièrement intéressantes.

§ 3. Détermination du facteur inhibiteur.

I. PREMIER ESSAI.

La reproductibilité des deux répétitions étant bonne, les résultats sont exprimés en groupant les deux répétitions et concernent donc 12 plants. Les croissances en poids (P %) et en surface foliaire (Sf %) sont rapportées à des valeurs initiales de 100, étant entendu que les poids et surface foliaire des différents traitements étaient sensiblement équivalents au départ.

A. Traitements réalisés.

1. pH 7 « naturel » : eau du fleuve Congo ;
2. pH 4 « artificiel » : obtenu par acidification des eaux du fleuve Congo par H_2SO_4 ;

(*) Les analyses de plantes ont été effectuées par la Division de CHIMIE AGRICOLE DE L'INÉAC à YANGAMBI.

3. pH 4 « naturel » : eau humique acide de pH 4 ;
4. pH 7 « artificiel » : eau précédente neutralisée jusqu'à pH 7 par NaOH.

B. *Tableau des résultats.*

Tableau XIII. — Résultats du 1^{er} essai.

Traite- ment	P %	Sf %	pH moyen en cours d'essai	Lg moyenne des raci- nes	Nombre de jours du trai- tement
1	191	123	6,75	35	30
2	129	76	4,10	30	32
3	104	24	4,07	17	38
4	170	88	6,70	35	31

Les variations des valeurs de P % et Sf % dans le temps sont exprimées dans le graphique 11.

C. *Précisions.*

a. — Comme il a été expliqué ci-dessus, le développement anormal des plants en conditions expérimentales ne permet qu'une comparaison plus ou moins qualitative des traitements envisagés.

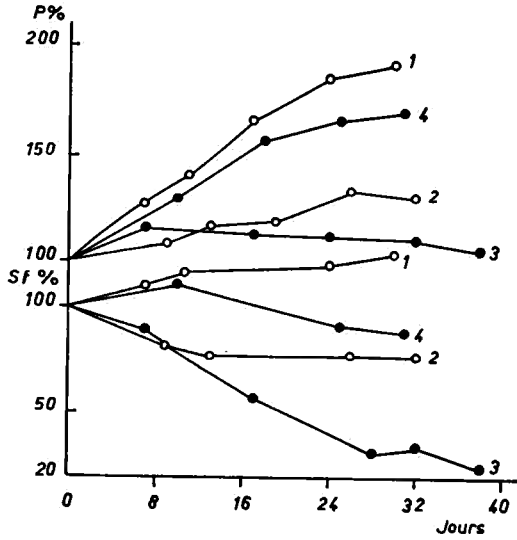
b. — Rappelons que les traitements à pH 4 ont comporté une phase d'accoutumance de 4-5 jours au pH définitif, phase comprise dans les résultats exprimés.

c. — L'aspect végétatif des plants dans les quatre traitements est le suivant :

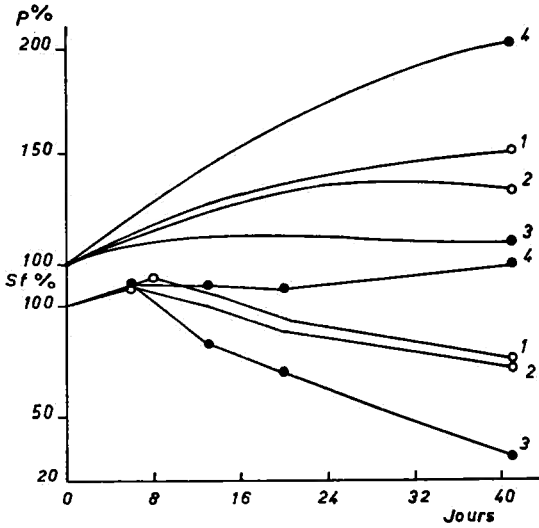
— en 1 et 4 : développement assez considérable des plants, feuilles bien vertes. Ce sont les 2 traitements qui ont présenté la croissance la plus normale.

— en 2 : les plantes se développent très peu mais subsistent, la teinte des feuilles étant presque normale.

— en 3 : les plantes sont pratiquement mortes, il ne reste plus que quelques petites feuilles vertes, les autres feuilles ayant fané complètement. Les racines sont réduites à une touffe courte et compacte de teinte foncée. Port rabattu.



GRAPHIQUE 11. — Croissances en poids et en surface foliaire, traitements 1 à 4, 1^{er} essai.



GRAPHIQUE 12. — Croissances en poids et en surface foliaire, traitements 1 à 4, 2^e essai.

d. — Le pH moyen obtenu dans les traitements 2 et 3 est légèrement supérieur à la valeur prévue de 4,0, à cause d'un certain relèvement du pH causé par la plante.

D. Discussion.

Alors que la croissance à pH 7 « artificiel » (traitement 4) semble se rapprocher de celle obtenue à pH 7 « naturel » (traitement 1), la forte différence de végétation observée entre les traitements 2 et 3 de pH 4 ne permet pas de mettre en cause l'effet exclusif du pH. On ne constate en effet dans le traitement 2 qu'un ralentissement de la croissance dû à l'ion H ajouté, tandis que dans le traitement 3, il y a dépérissement irréversible des plantes par fanaison quasi totale des feuilles. Il est cependant permis de se demander si cette différence d'intensité observée dans l'effet de l'ion H n'est pas due à la différence dans la composition minérale des eaux, le traitement 2 étant réalisé avec des eaux complètement neutralisées du fleuve Congo, beaucoup plus riches en éléments minéraux (0,510 mequ/l) que les eaux humiques acides utilisées dans le traitement 3 (0,068 mequ/l). Le choix reste dès lors possible entre deux hypothèses :

a. — L'ion H est cause de la toxicité, mais uniquement dans des eaux pauvres, comme le sont les eaux humiques acides. Dans des eaux plus riches, l'ion H n'aurait plus qu'un effet inhibiteur sur la croissance, mais non plus toxique ;

b. — L'ion H n'a, dans les eaux humiques acides, qu'un effet inhibiteur, l'effet toxique observé aux pH bas dans ces eaux étant dû à un facteur accompagnant l'ion H, tel que les matières humiques par exemple.

II. SECOND ESSAI.

Afin de déterminer laquelle des deux hypothèses précédentes est valable, un second essai a été réalisé en utilisant uniquement des eaux humiques acides, de façon à mettre hors de cause des différences éventuelles dans la richesse minérale des eaux des divers traitements.

A. *Traitements réalisés.*

1. pH 5 « naturel » : eau humique acide de pH 5 ;
2. pH 4 « artificiel » : obtenu par acidification des eaux précédentes par H_2SO_4 ;
3. pH 4 « naturel » : eau humique acide de pH 4 ;
4. pH 5 « artificiel » : eau précédente neutralisée partiellement par NaOH.

B. *Tableau des résultats*Tableau XIV. — Résultats du 2^e essai.

Traite- ment	P %	Sf %	pH moyen en cours d'essai	Lg moyenne des ra- cines	Nombre de jours de traite- ment
1	151	75	5,24	53	41
2	133	71	4,12	19	41
3	110	32	4,08	18	41
4	202	120	5,14	61	41

Les variations des valeurs de P % et Sf % dans le temps, sont exprimées dans le *graphique 12*.

C. *Précisions.*

a. — On note par rapport à l'essai précédent un meilleur développement des plants, dû à la réduction des manipulations et à l'addition d'une solution nutritive. Ce développement ne peut cependant être considéré comme normal, aussi la comparaison des traitements ne peut-elle être, ici aussi, que plus ou moins qualitative.

b. — L'aspect végétatif des plants dans les 4 traitements est le suivant (voir *photo I*) :

— En 1 : Développement non satisfaisant des feuilles, pour les raisons indiquées plus haut, développement important des racines ;

— En 4 : Développement satisfaisant des feuilles, développement important des racines ;

— En 3 : Mêmes observations que dans l'essai précédent ; les ébauches de stolons sont complètement fanées ;

— En 2 : On observe une fanaison des feuilles moins accentuée que dans le traitement 3. Le développement des racines semble par contre inhibé comme dans le traitement 3.

D. Discussion.

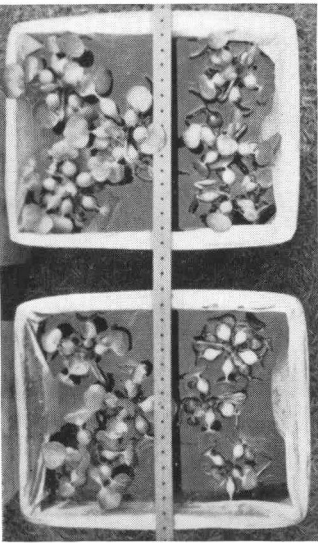
La neutralisation partielle de l'acidité humique par NaOH, entraîne bien, comme dans l'essai précédent, la suppression de l'influence toxique observée aux bas pH. Il semble même que l'addition de l'ion Na, existant par ailleurs en concentration très faible dans les organes d'*Eichhornia crassipes*, ait une influence favorable, car le développement des plants soumis à ce traitement est nettement supérieur à celui observé dans tous les traitements réalisés simultanément.

La comparaison des traitements 2 et 3 à pH 4, indique un effet défavorable moins accentué à pH 4 « artificiel » qu'à pH 4 « naturel ». Elle confirme par conséquent la seconde hypothèse formulée plus haut, à savoir que l'ion H ne manifeste dans les eaux humiques acides de pH 4-4,2 qu'un effet inhibiteur, l'effet toxique devant être attribué à un autre facteur accompagnant l'ion H.

III. DISCUSSION DE L'EFFET PHYSIOLOGIQUE DE L'ION H SUR LA CROISSANCE DE LA JACINTHE D'EAU.

L'influence écologique et physiologique de l'ion H sur la croissance des végétaux a fait l'objet de nombreux travaux. Si certains végétaux spécialement adaptés peuvent croître à des pH extrêmes de 3 ou de 10, la croissance de la majorité des végétaux est cependant limitée à l'intervalle de pH 4 à 8. Suivant le pH optimum à leur croissance, on distingue différentes classes de végétaux, depuis les acidophiles stricts jusqu'aux basophiles stricts. Dans le domaine acide qui nous intéresse ici, BRAUN-BLANQUET (cf ELLENBERG [14]) cite les limites de pH optimum 3,8 et 5,2 pour les plantes strictement acidophiles. D'après le travail déjà ancien de PARIJA [26], le pH optimum de croissance de la jacinthe d'eau dans des eaux de l'Inde, aux caractéristiques physico-chimiques malheureusement non précisées, se situerait vers pH 7, ce qui ferait considérer cette plante comme neutrophile. Mais cet

PHOTO 1.



1.
pH 5
« nat. »

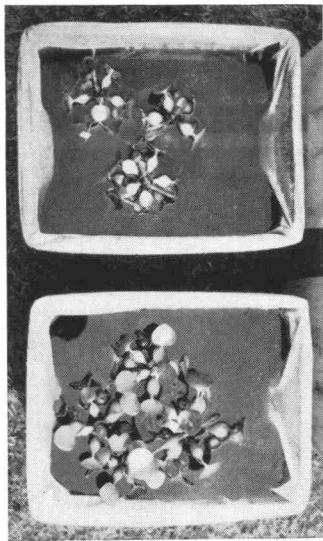
3.
pH 4
« nat. »

4.
pH 5
« art. »

2.
pH 4
« art. »

pH 4
+ Ca,
Mg, K

PHOTO 2.



pH 4

PHOTO 3.



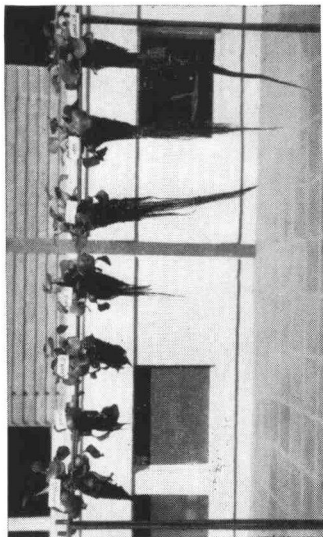
pH 4,2

pH 4,6

pH 4

pH 4,4

PHOTO 4.



pH 4 « art. » ; 4 « nat. » ; 4,2 ; 4,4 ; 4,6 ; 5 « nat. » ; 5 « art. ».

Aspect végétatif des plantes au cours d'une étude expérimentale de l'influence écologique des eaux humiques acides sur *Eichhornia crassipes*.

optimum élevé n'empêche pas l'*E. crassipes* de se développer très bien dans des eaux de pH voisin ou inférieur à 5. Nos essais indiquent cependant une inhibition certaine de la croissance à pH 4, et les essais de PARIJA mentionnés ci-dessus aboutissaient à la même conclusion.

Quant au mécanisme faisant intervenir le pH sur la croissance, ELLENBERG [14] estime le problème trop complexe que pour avoir trouvé actuellement une solution satisfaisante. Il signale cependant deux hypothèses concernant ce mécanisme, hypothèses qui pourraient nous amener à une meilleure compréhension des essais réalisés. La première hypothèse est celle de MEVIUS (cf ELLENBERG [14]), faisant intervenir la perméabilité des cellules des racines en relation avec la concentration en sels et le pH.

La perméabilité cellulaire sélective serait conditionnée, d'une part par les éléments minéraux en solution et par la température, d'autre part par le pH de cette solution minérale. Le mécanisme d'action du pH interviendrait précisément dans cette perméabilité : un excès d'ions H ou OH entraînerait en effet une brusque augmentation de la perméabilité cellulaire et par conséquent, une tendance à l'égalisation des concentrations ioniques entre le milieu intérieur cellulaire et le milieu extérieur.

La seconde hypothèse (WANNER cf ELLENBERG [14]) tente d'expliquer le mécanisme d'absorption des cations et des anions du milieu extérieur par la membrane cellulaire. Cette dernière, grâce à sa constitution protéinique amphotère, échangerait des ions H et OH contre des cations et des anions du milieu extérieur.

Les groupements responsables de cet échange seraient les groupements carboxyles - COOH et aminés - NH₂ des molécules protéiques. L'absorption des ions dépendra du degré de dissociation de ces groupements, lui-même en relation avec le pH ; c'est ce qui expliquerait l'augmentation d'absorption des anions et la diminution d'absorption des cations, généralement observées aux pH faibles.

Les deux hypothèses font donc intervenir la perméabilité de la membrane cellulaire et montrent que l'effet défavorable d'un pH faible ne peut être interprété qu'en relation avec la concentration minérale du milieu extérieur. C'est seulement dans les conditions conjointes de bas pH et de pauvreté minérale que l'ion H exerce sur les plantes une influence physiologique néfaste. Les

résultats de ASLANDER (cités par ELLENBERG [14]) sont significatifs à ce point de vue (voir *tableau XV*).

Tableau XV. — Essai de ASLANDER : effets du pH en relation avec la concentration minérale.

Concentration de la solution nutritive	Poids sec par plant d'orge de 2 mois, mg		Idem en % du meilleur traitement (649)	
	pH 6,75	pH 4,0	pH 6,75	pH 4,0
1 / 1	649	547	100	84
1 / 20	624	218	96	34
1 / 80	389	52	60	8

Le même auteur signale d'ailleurs que de nombreuses solutions nutritives classiques ont des pH inférieurs à 4.

Toujours dans le chapitre de l'effet physiologique des bas pH sur les végétaux, STENLID [30] parle des pertes en sels par les racines. Ce phénomène inverse de l'absorption pourrait, d'après cet auteur, intervenir par échange des cations des racines contre des ions H de la solution. Dans ces conditions, il est évident que les concentrations minérales interviendront en relation avec la concentration de l'ion H pour accentuer ou diminuer cet échange défavorable.

A ce point de vue, il est utile de comparer ici les concentrations relatives de H⁺ et des autres ions, au pH de 4 et 5, dans les eaux humiques acides. D'après les formules simplifiées reliant la conductivité saline au pH dans les eaux humiques acides (voir p. 17) :

$$k_{sal.} = 38,9 - 6,2 \text{ pH (série YBI)} = 14,1 \text{ à pH 4,}$$

$$k_{sal.} = 25,2 - 3,6 \text{ pH (série EC)} = 10,8 \text{ à pH 4,}$$

nous trouvons à pH 4 des valeurs situées entre 10,8 et 14,1, correspondant à des concentrations cationiques de l'ordre de 0,080 à 0,110 mequ/l. Ces valeurs très faibles seraient encore légèrement surestimées à cause de la présence d'une acidité forte dans les eaux humiques acides de bas pH. Pour simplifier la comparaison, nous considérerons une valeur de concentration cationique (sans H⁺) de 0,100 mequ/l.

1°. A pH 4, $[H^+] = 0,100$ mequ/l et le rapport de la concentration cationique (sans H^+) à la concentration en H^+ sera de $0,100/0,100 = 1$;

2°. A pH 5, $[H^+] = 0,010$ mequ/l, ce même rapport sera par contre de $0,100/0,010 = 10$.

Cette comparaison indique immédiatement la part essentielle que prend l'ion H aux bas pH dans la composition cationique d'eaux aussi pauvres que les eaux humiques acides.

Cette discussion de l'effet physiologique du pH permet d'interpréter les résultats obtenus au cours des essais précédemment décrits. Dans le traitement 2 du 1^{er} essai, réalisé avec une eau du fleuve Congo acidifiée jusqu'à pH 4, les plantes se développent peu, tout en conservant une apparence normale des parties aériennes, avec un développement racinaire à peine diminué. L'effet du pH y est donc seulement inhibiteur mais non toxique, grâce à une composition minérale nettement plus riche que dans les eaux humiques acides. Nous avons vu en effet que les eaux des rives du fleuve Congo présentent à Yangambi une concentration cationique moyenne de quelque 0,510 mequ/l, ce qui fournit un rapport cations/ H^+ de 5 à pH 4.

Le traitement 2 du 2^e essai, réalisé par contre avec une eau humique acide de pH 5 acidifiée jusqu'à pH 4, présente un effet nettement plus défavorable. Si cet effet n'apparaît guère dans la comparaison des valeurs respectives de P % et Sf % dans le 2^e essai par rapport au 1^{er}, et ceci à cause des conditions expérimentales différentes (manipulations moindres, addition d'une solution nutritive dans le 2^e essai), il apparaît par contre nettement dans l'aspect végétatif, par une fanaison assez importante des feuilles et un développement racinaire fortement diminué (voir *photo 4*).

IV. DISCUSSION DE L'INFLUENCE DES MATIÈRES HUMIQUES SUR LA CROISSANCE DE LA JACINTHE D'EAU.

L'effet physiologique de l'ion H décrit ci-dessus ne permet pas d'expliquer la différence fondamentale observée dans les effets des pH 4 « naturel » (traitement 3) et « artificiel » (traitement 2), le premier apparaissant comme nettement toxique, le second plu-

tôt comme inhibiteur. Une hypothèse plausible serait que le déséquilibre minéral entraîné par l'ion H aux bas pH et à concentration cationique faible, serait accentué encore par une indisponibilité des éléments minéraux par adsorption sur les matières humiques colloïdales. Pour pouvoir juger de la validité d'une telle hypothèse faisant intervenir uniquement un déséquilibre minéral, il suffirait de noter la disparition de l'effet toxique des eaux humiques acides de pH 4, par simple addition d'une solution minérale fournissant les cations importants Ca, Mg et K.

Faute de temps, un tel essai n'a pu être réalisé que sur un plan purement qualitatif, sans mesure de croissance comme dans le cas des essais précédents. Le traitement a consisté en l'addition à une eau humique acide de pH 4 « naturel » (voir traitement 3), d'une solution minérale portant les concentrations en Ca, Mg et K au décuple de leur concentration originelle (Ca 10, Mg 10, K 10), par addition de CaSO_4 , MgSO_4 et KCl (soit [Ca] 3,7 mg/l, [Mg] 1,3 mg/l, [K] 7mg/l). Après 23 jours de ce traitement, les plants présentent un aspect végétatif très satisfaisant, les feuilles étant bien vertes et la fanaison des feuilles périphériques étant compensée par la production de nouvelles feuilles. Le système racinaire a même longueur qu'au début du traitement (25-30 cm) et présente un aspect normal. Ces observations permettent d'affirmer que l'effet toxique proprement dit a bien disparu.

Le traitement est alors poursuivi pendant 18 jours avec les mêmes plants sous la forme Mg 10, K 10, par addition de MgSO_4 et de KCl. Les plantes continuent à présenter un aspect végétatif satisfaisant (voir *photo 2*).

Enfin, la poursuite du traitement, sous la forme K 10, confirme la disparition de l'effet toxique observé en eaux humiques acides naturelles de pH 4, par simple addition de l'ion K.

Bien des précisions seraient nécessaires pour mettre en lumière les phénomènes d'adsorption des cations par les matières humiques colloïdales et leur incidence sur la phase d'adsorption des éléments minéraux à la surface des racines, phase qui, on le sait, représente l'étape préliminaire de l'absorption minérale par les racines (LUNDEGARDH [22], GAUCH [15], ROBERTSON [27]).

Le mécanisme essentiel semblerait consister en une sorte de concurrence dans les phénomènes d'adsorption des cations, entre les colloïdes des racines et les colloïdes humiques de l'eau. Dans

cette concurrence interviendraient évidemment les capacités d'échange respectives de ces colloïdes, les énergies d'adsorption des différents ions et les concentrations des cations en solution. La nature des colloïdes humiques des eaux congolaises serait évidemment à préciser.

Les travaux qui ont porté sur la nature des acides humiques sont peu nombreux. Ceux cités par GESSNER [17] et SCHEFFER [29], leur attribuent une formule hétérocyclique de polyoxyphénols polymères, à poids moléculaire d'environ 1 000, à groupements réactionnels acides -OH. Malgré la diversité d'assemblages de la molécule, ces acides humiques présentent un comportement colloïdal identique.

Le problème de l'absorption minérale des plantes aquatiques dans les eaux humiques acides se rattache dès lors au problème de l'absorption minérale des plantes dans les sols riches en colloïdes organiques, tels que les sols des tourbières. Cela montre combien ces eaux se distinguent, aussi bien du point de vue physico-chimique que du point de vue écologique, des eaux classiquement décrites en limnologie.

V. RECHERCHE DU CATION LE PLUS EN CAUSE DANS LE DÉSÉQUILIBRE MINÉRAL OBSERVÉ AUX PH FAIBLES DANS LES EAUX HUMIQUES ACIDES.

D'après les considérations qui précèdent, l'effet toxique sur *Eichhornia crassipes* des pH faibles en eaux humiques acides, doit être attribué à un déséquilibre minéral cationique dû à deux causes complémentaires :

1° — Influence propre de l'ion H^+ sur l'absorption minérale cationique, suivant un mécanisme faisant intervenir la perméabilité cellulaire ;

2° -- Influence des substances colloïdales humiques, suivant un mécanisme d'adsorption colloïdale, rendant en partie indisponibles les cations minéraux.

Il est dès lors permis de se demander lequel des cations Ca, Mg ou K, généralement accumulés dans les plantes, est le plus en cause dans le déséquilibre cationique mentionné.

Étant donné les fortes teneurs en K des organes de la jacinthe d'eau, on serait tenté d'incriminer plus spécialement cet ion. Par ailleurs, l'essai réalisé en eau humique acide de pH 4, avec addition de KCl (K 10), ayant entraîné la disparition de l'effet toxique, permettrait apparemment d'incriminer a priori l'ion K. Il n'en est rien cependant, car l'augmentation de concentration en K dans cet essai doit avoir provoqué une désorption partielle des différents ions et donc une plus grande disponibilité de ceux-ci pour la plante. Il en a d'ailleurs été de même dans le traitement 4, par augmentation de la concentration en Na (qui a coïncidé de plus avec une augmentation de pH).

Les analyses effectuées sur le matériel foliaire après les divers traitements, permet quelques constatations intéressantes. Dans le *tableau XVI* sont exprimées, en plus des teneurs, les quantités des éléments analysés présentes à la fin de l'essai dans les feuilles des 12 plants soumis aux traitements.

Interprétation du tableau.

1) La comparaison entre les traitements 1 et 2 concerne l'effet propre du pH. On note une diminution nette des teneurs et des quantités présentes dans les feuilles, des cations Ca et Mg, et une légère augmentation pour K. Il faut cependant faire remarquer que si l'on considère la plante entière et non seulement les feuilles, le développement racinaire beaucoup plus important dans le traitement 1 doit entraîner pour K également une quantité présente dans les plantes supérieure dans le traitement 1.

Quoi qu'il en soit, il semble que les ions Ca et Mg soient plus touchés par l'effet du pH que l'ion K.

2) La comparaison entre les traitements 2 et 3 concerne l'effet propre des matières humiques colloïdales.

Elle indique une nette diminution des quantités des 3 cations principaux, présentes dans les feuilles. L'effet en cause toucherait donc chacun des 3 ions.

3) La comparaison des 4 traitements indique une forte variation des teneurs en Ca et Mg dans les feuilles.

Par contre, K a une teneur beaucoup plus stable. Ceci laisse supposer que contrairement à Ca et Mg, la teneur en K ne peut descendre en-dessous d'une certaine valeur dans les feuilles. Dans

Tableau XVI. — Analyses sur le matériel foliaire après les divers traitements.

Traitement	Teneurs (en % du poids sec)						mg dans les feuilles de 12 plants					
	Ca	Mg	K	Na	N	P	Ca	Mg	K	Na	N	P
	1. pH 5 « nat. »	0,86	0,78	3,80	0,006	2,68	0,094	38	35	169	0,3	119
2. pH 4 « art. »	0,54	0,42	4,10	0,006	2,68	0,087	26	20	198	0,3	130	4,2
3. pH 4 « nat. »	0,32	0,50	3,00	0,001	2,74	0,115	5	9	52	0,02	47	2,0
4. pH 5 « art. »	1,09	0,98	3,80	0,028	3,26	0,090	89	80	309	2,3	265	7,3

Tableau XVII. — Résultats de l'essai de détermination du seuil de pH inhibiteur dans les eaux humiques acides.

Traite- ment	pH prévu	1° essai						2° essai					
		pH eff. moyen	Jours du trait.	P %	Sf %	Lg moyen. des rac.	pH eff. moyen	Jours du trait.	P %	Sf %	Lg moyen. des rac.		
a.	4,0	4,07	38	104	24	± 15	4,08	41	110	32	18		
b.	4,2	4,24	37	112	31	± 25	4,21	41	119	57	20		
c.	4,4	4,44	34	123	44	± 25	4,40	41	138	81	28		
d.	4,6	4,64	33	125	48	± 30	4,73	41	169	95	49		
e.	4,8	4,84	33	128	55	± 35	4,97	41	168	84	49		
f.	5,0	4,97	31	142	63	± 35	5,24	41	151	75	53		

ces conditions, la seule possibilité offerte à la plante en cas de déficit en K, est de diminuer sa surface foliaire.

Même si l'effet du pH touche davantage Ca et Mg, il reste donc probable que K soit le premier facteur limitant, en ce sens qu'une faible diminution de l'absorption de cet élément doit entraîner une réduction de la surface foliaire, alors qu'une diminution même plus accentuée de l'absorption de Ca et Mg se manifesterait d'abord par une teneur plus faible en ces ions dans les feuilles.

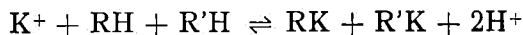
La même observation doit être faite à propos des teneurs en N et P, assez stables dans les 4 traitements.

N.B. — La comparaison entre les traitements 1 et 4 concerne l'effet de l'ion Na. Sa faible teneur dans les feuilles ne permet pas d'admettre que Na exercerait une action favorable sur la croissance en se substituant à K, ainsi qu'il peut le faire chez différentes plantes (STILES [31]). L'effet nettement favorable observé dans le traitement 4 devrait dès lors être attribué à un effet indirect de la concentration en Na sur l'absorption des autres ions, à moins qu'il ne s'agisse d'un effet favorable des matières humiques partiellement neutralisées.

VI. SYNTHÈSE DE L'EFFET PHYSIOLOGIQUE DU pH ET DES MATIÈRES HUMIQUES ACIDES.

Pour résumer ce qui a été dit du mécanisme d'inhibition de la croissance d'*Eichhornia crassipes* dans les eaux humiques acides de pH faible, il semble qu'on puisse affirmer qu'il s'agit essentiellement d'un déséquilibre minéral cationique, surtout en ion K, entraîné d'une part par l'effet physiologique défavorable de l'ion H dans des eaux pauvres, d'autre part par l'indisponibilité relative des cations dans des eaux à forte teneur en colloïdes organiques.

Nous pourrions schématiser ce mécanisme d'inhibition par une formule citée par GAUCH [15] pour mettre en évidence l'effet défavorable du pH sur l'absorption de K, formule qui pourrait être complétée comme suit pour y inclure l'effet des matières humiques colloïdales :



où K^+ représente l'ion potassium en solution dans l'eau ;

RH, les molécules organiques des racines, de charge négative, pouvant échanger leur H contre K ;

R'H les molécules des matières humiques acides, pouvant, elles aussi, adsorber l'ion K.

D'après cette formule, toute augmentation de K doit augmenter l'absorption de cet élément par les racines, sous forme du composé RK. Par contre, toute augmentation de H déplace l'équilibre vers la gauche et diminue l'absorption de K. Enfin, toute augmentation de R'H (matières humiques acides), favorise l'adsorption de K sur R' au détriment de R.

VII. INFLUENCE DES MATIÈRES HUMIQUES ACIDES SUR L'ABSORPTION DU PHOSPHORE.

Le déséquilibre cationique discuté ci-dessus pourrait se doubler d'un déficit en ion PO_4 . Plusieurs auteurs ont signalé une carence physiologique en P dans les eaux fortement humiques (GESSNER [17]). Ce fait serait attribuable à une liaison colloïdale de P avec les combinaisons du fer et les composés organiques colloïdaux (OHLE [25]).

Il est donc plausible d'incriminer une carence à la fois cationique, surtout en K, et anionique en PO_4 . Il s'agit d'ailleurs de deux éléments fortement concentrés dans les organes de la jacinthe d'eau, par rapport à leur concentration très faible dans les eaux.

VIII. CROISSANCE DE LA JACINTHE EN EAUX HUMIQUES ACIDES PEU RENOUVELÉES.

Le déséquilibre minéral intervenant dans les eaux humiques acides de pH faible, peut également apparaître dans ces mêmes eaux à pH plus élevé, si le renouvellement de l'eau est insuffisant pour compenser l'appauvrissement minéral entraîné par le pompage de la plante. Il a été fait mention précédemment d'une carence supposée en K, N et P pour expliquer le mauvais développement foliaire des plants en conditions expérimentales. Des observations dans la nature semblent aboutir aux mêmes conclusions. L'exemple le plus frappant est celui d'un massif d'*Eichhornia crassipes* dans un grand étang de la station piscicole de Yaekama,

à alimentation très faible en eaux humiques acides de pH 5 : ce massif présente autour du point d'alimentation en eau, une végétation en forme de demi-cône, de hauteur supérieure à 1 m au point d'alimentation et s'aplatissant graduellement sur les pourtours, pour atteindre une hauteur de 15 cm à quelque 4 m du point d'alimentation. Des analyses physico-chimiques indiquent un appauvrissement de l'eau au fur et à mesure qu'on s'écarte de ce point, appauvrissement spécialement important en NO_3 , et qui se traduit par une diminution de la conductivité saline.

Une inhibition aussi accentuée de la croissance de la plante par diminution des teneurs minérales d'une eau humique acide de pH 5, porte à admettre que la composition minérale de ces eaux (et spécialement en K, N et P) n'est que légèrement supérieure au seuil de concentration permettant l'absorption par la plante des éléments minéraux nécessaires à sa croissance ; cette composition pourra descendre en-dessous de ce seuil, soit par renouvellement insuffisant de l'eau, soit par indisponibilité partielle des teneurs minérales causée par l'ion H et les matières colloïdales humiques.

Si, en plus de ces facteurs limitatifs, on considère les propriétés optiques défavorables à la photosynthèse des algues en eaux humiques fortement colorées (voir chapitre I), on synthétise en quelque sorte les causes de la productivité biologique particulièrement faible de ces eaux.

§ 4. Détermination du seuil de pH inhibiteur dans les eaux humiques acides.

I. CRITIQUE DES CONDITIONS EXPÉRIMENTALES.

Comme il a été dit plus haut, le mauvais développement foliaire observé dans les bacs d'essai, empêche de formuler des conclusions certaines à partir des résultats obtenus.

En dehors du développement foliaire non satisfaisant, causé par l'appauvrissement de l'eau, les conditions expérimentales se sont écartées des conditions naturelles par plusieurs points importants :

- 1) Par suite du relèvement du pH entraîné dans les bacs de culture par le développement des plants, la teneur en matières humiques a dû être légèrement augmentée par rapport à celle des

eaux naturelles de même pH, en vue d'obtenir un pH moyen déterminé.

2) Le pH moyen obtenu a, en fait, subi de légères variations autour des moyennes indiquées.

3) Les teneurs minérales ont elles-mêmes présenté des variations, en rapport avec le pompage par les plantes et l'addition de la solution nutritive.

4) Les températures diurnes dans les bacs ont certainement été supérieures à celles rencontrées dans la nature.

5) La longueur des racines, beaucoup plus grande en conditions expérimentales qu'en conditions naturelles, pourrait correspondre à des différences profondes dans les phénomènes d'absorption au niveau des racines.

II. TABLEAU DES RÉSULTATS (voir *tableau XVII*)

III. DISCUSSION.

1) Les traitements à pH 4 et 4,2 manifestent très rapidement sur *E. crassipes* l'effet toxique observé dans la nature et qui a été décrit plus haut. Les résultats de croissance obtenus pour ces deux traitements mettent nettement en évidence cet effet toxique.

Il est à remarquer que la croissance en longueur des racines dans le 2^e essai a été particulièrement affectée à ces pH faibles (voir *photo 4*). La croissance en longueur, plus faible dans le 1^{er} essai que dans le 2^e, est à attribuer aux manipulations excessives des plants au cours du 1^{er} essai.

2) Les résultats obtenus, pas plus que l'aspect végétatif des feuilles, dans le traitement à pH 4,4, ne permettent de considérer ce pH comme certainement inhibiteur de la croissance de la jacinthe d'eau dans les conditions expérimentales (voir *photo 3*).

Il convient cependant de noter que dans ces conditions, l'allongement des racines à pH 4,4 est fortement inhibé (voir *photo 4*) ; étant donné la longueur beaucoup plus faible des racines en conditions naturelles, il serait cependant hasardeux de vouloir conclure à un effet inhibiteur du pH 4,4 sur le développement de la jacinthe d'eau.

Les observations réalisées dans la nature, touchant l'inhibition d'*E. crassipes* dans les eaux de la Ruki, à pH 4,3-4,5, tendent par contre à faire considérer la zone de pH 4,2-4,5 des eaux humiques acides, comme inhibitrice quoique non toxique.

3) Les traitements à pH 4,6 à 5,0 présentent une gradation croissante des résultats P % et Sf % dans le 1^{er} essai, et décroissante dans le 2^e essai. Les résultats obtenus et l'aspect végétatif des plants montrent clairement que ces pH ne sont pas inhibiteurs de la croissance de la jacinthe d'eau. Nous avons d'ailleurs signalé la bonne croissance présentée par la plante en conditions naturelles, dans des eaux humiques acides de pH moyen égal à 4,78 (pendant 51 jours, avec des variations de 4,6 à 5,1).

4) Le maximum de croissance, de même que l'optimum de l'aspect végétatif des plants, obtenus dans le 2^e essai pour le traitement à pH 4,6 (pH effectif moyen 4,73), est difficile à interpréter.

Pourrait-on soupçonner dans ce fait une action favorable des matières humiques à une certaine concentration et à un pH qui n'exerce plus lui-même d'effet inhibiteur ? Citons à ce sujet les observations de BLANCHET [4], signalant un effet stimulant d'une teneur faible en colloïdes humiques sur l'absorption par les plantes de K et de P, les deux éléments dont l'absorption semble précisément inhibée dans nos essais, en présence de fortes teneurs en matières humiques acides.

Conclusions générales

Le degré d'inhibition de la croissance de la jacinthe d'eau dans les eaux humiques acides de pH faible doit se comprendre à la lumière de trois facteurs principaux : teneur en ion H (pH), teneur en matières humiques colloïdales, teneurs minérales.

Les deux premiers facteurs mentionnés concourent l'un et l'autre à inhiber l'absorption des éléments minéraux, ce qui signifie que dans des conditions expérimentales où les trois facteurs présenteraient des combinaisons variables, l'effet inhibiteur du pH et des matières humiques colloïdales serait inversement proportionnel aux teneurs minérales présentes, et donc d'autant plus intense que les teneurs minérales seraient faibles.

En conditions naturelles, dans les eaux humiques acides de la cuvette congolaise, on constate cependant une relation beaucoup plus simple entre les trois facteurs mentionnés, le pH suffisant à déterminer le degré d'inhibition de la croissance d'*Eichhornia crassipes* : dépérissement de la plante à pH égal ou inférieur à 4,2, simple inhibition à pH situé entre 4,2 et 4,5, croissance importante à pH supérieur à 4,5, dans des conditions de renouvellement continu de l'eau.

L'homogénéité de composition physico-chimique des eaux humiques acides, mise en évidence dans le chapitre I, permet de comprendre pourquoi cette relation entre les trois facteurs est plus simple en conditions naturelles qu'en conditions expérimentales : la teneur en matières humiques acides est en effet, dans ces eaux, en relation assez stricte avec le pH, tandis que les teneurs minérales très pauvres présentent dans les rivières importantes des variations faibles autour de moyennes générales, valables pour toutes les eaux de la catégorie considérée.

Il a donc été possible, dans le chapitre II, d'établir sur la base du pH une classification des rivières de la cuvette congolaise quant à la possibilité d'infestation éventuelle par la jacinthe d'eau. Il ressort de cette classification que sont envahissables les

rivières dont les eaux d'amont, originaires des plateaux, constituent une part importante du débit, tandis que les rivières limitées à la cuvette centrale proprement dite sont définitivement à l'abri de toute infestation par *Eichhornia crassipes*.

Cette étude sur le rôle écologique des eaux humiques acides sur la croissance de la jacinthe d'eau, permet par ailleurs de dégager les causes essentielles de la productivité biologique faible de ces eaux, dont la répartition géographique s'étend sur une surface importante du bassin congolais.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BAUMEISTER, W. : Hauptnährstoffe, in *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, Band IV. Die mineralische Ernährung der Pflanze (Springer Verlag, Berlin, 1958, pp. 482-557).
- [2] BERG, A. : Analyse des conditions impropres au développement de la jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes* (MART.) SOLMS) dans certaines rivières de la cuvette congolaise (*Bulletin Agricole du Congo belge*, 1959, L, n° 2, pp. 365-94).
- [3] — : Rapport de l'enquête Administration-I. N. É. A. C. sur la jacinthe d'eau (I. N. É. A. C., Yangambi, 1959).
- [4] BLANCHET, R. : Influence des colloïdes humiques sur différentes phases de l'absorption des éléments minéraux par les plantes (*Compte-Rendus Acad. Sc., France*, 1957, 244, n° 19, pp. 2418-20).
- [5] CAHEN, L. et LEPERSONNE, J. : Atlas général du Congo belge. Notice de la carte géologique du Congo belge et du Ruanda-Urundi (*Inst. Royal Col. belge*, Bruxelles, 1951, 27 pp).
- [6] CCTA/CSA : Colloque sur l'*Eichhornia crassipes* (Léopoldville, 1957).
- [7] CLERFAYT, A. : Les eaux d'alimentation du Congo belge (*Bull. Centre Belge d'Ét. Doc. Eaux*, 1955, 29, pp. 186-97).
- [8] — : Composition des eaux de rivières au Congo. Influence des facteurs géologiques et climatiques (*Bull. Centre Belge d'Ét. Doc. Eaux*, 1956, 31, pp. 26-31).
- [9] DE KIMPE, P. : Le contrôle de la jacinthe d'eau (*Bulletin Agricole du Congo belge*, 1957, XLVIII, n° 1, pp. 105-52).
- [10] — : Extraits de l'« Aperçu général du problème *Eichhornia crassipes* » (CCTA/CSA, Colloque sur l'*Eichhornia crassipes*, Léopoldville, 1957).
- [11] DE KIMPE, P., MAURISSEN et KIRKPATRICK : Rapport d'une mission sur le fleuve, septembre 1957 (Service des Voies Navigables, Léopoldville, 1957).
- [12] DEVRED, R. : Carte de la végétation forestière du Congo belge et du Ruanda-Urundi (*Bull. Soc. Roy. For. de Belgique*, 1958, 65, n° 6).
- [13] DEVROEY, E.-J. : Annuaire hydrologique du Congo belge et du Ruanda-Urundi pour 1954 (Acad. Roy. Sci. Col., Bruxelles, 1955, III, 1, 378 pp.).
- [14] ELLENBERG, H. : Bodenreaktion (einschliesslich Kalkfrage), in *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, Band IV. Die mineralische Ernährung der Pflanze (Springer Verlag, Berlin, 1958, pp. 638-708).
- [15] GAUCH, H. G. : Mineral nutrition of plants (*Annual Review of Plant Physiology*, 1957, 8, pp. 31-64).
- [16] GESSNER, F. : Hydrobotanik. Die physiologischen Grundlagen der Pflanzenverbreitung im Wasser. I. Energiehaushalt II. Stoff-

- haushalt (VEB, Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1955-1958).
- [17] — : Die Binnengewässer, in *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, Band IV. Die mineralische Ernährung der Pflanze (Springer Verlag, Berlin, 1958, pp. 179-232).
- [18] GORHAM, E. : The development of peat lands (*The Quarterly Review of Biology*, 1957, 32, n° 2, pp. 145-66).
- [19] HOMES, M. V. : L'alimentation minérale des plantes et le problème des engrais chimiques (Éd. Sciences et Lettres, Liège, 1953).
- [20] HUTCHINSON, G. E. : A treatise on limnology. Vol. I. Geography, Physics and Chemistry (J. Wiley and Sons, New York-London, 1957, 1.015 pp.).
- [21] LEBRUN, J. : Un « péril vert » au Congo : la jacinthe d'eau (*Belgique d'Outre-Mer*, 1959, n° 287, pp. 88-90).
- [22] LUNDEGARDH, H. : Investigations on the mechanism of absorption and accumulation of salts. I. Initial absorption and continued accumulation of potassium chloride by wheat roots (*Physiologia Plantarum*, 1958, 11, n° 2, pp. 332-46).
- [23] MARLIER, G. : Recherches hydrobiologiques dans les rivières du Congo oriental. I. Composition des eaux. Conductibilité électrique (*Hydrobiologia*, 1951, III, pp. 217-28).
- [24] — : Recherches hydrobiologiques dans les rivières du Congo oriental. II. Études écologiques (*Hydrobiologia*, 1954, VI, pp. 225-63).
- [25] OHLE, W. : Kolloidgele als Nährstoffregulatoren der Gewässer (*Naturwissenschaften*, 1937, 25, pp. 471-74).
- [26] PARIJA, P. : Physiological investigations on water hyacinth (*E. crassipes*) in Orissa, with notes on some aquatic weeds (*Indian J. Agric. Sci.*, 1934, IV, pp. 399-429).
- [27] ROBERTSON, R. N. : The uptake of minerals, in *Handbuch der Pflanzenphysiologie*. Band IV. Die mineralische Ernährung der Pflanze (Springer Verlag, Berlin, 1958, 243-79).
- [28] ROBYNS, W. : Le genre Eichhornia, spécialement *E. crassipes* (jacinthe d'eau) au Congo belge (*Acad. Roy. Sc. Col., Bulletin des Séances*, Bruxelles, 1955, I, n° 6, pp. 1116-37).
- [29] SCHEFFER, F. : Der organisch gebundene Stickstoff des Bodens, in *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, Band VIII. Der Stickstoffumsatz (Springer Verlag, Berlin, 1958, pp. 179-200).
- [30] STENLID, G. : Salt losses and redistribution of salts in higher plants, in *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, Band IV. Die mineralische Ernährung der Pflanze (Springer Verlag, Berlin, 1958, pp. 615-37).
- [31] STILES, W. : Essential micro-(trace) elements, in *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, Band IV. Die mineralische Ernährung der Pflanze (Springer Verlag, Berlin, 1958, pp. 558-98).
- [32] WIKLANDER, L. : The soil, in *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, IV. Die mineralische Ernährung der Pflanze (Springer Verlag, Berlin, 1958, pp. 118-69).

SUMMARY

After many other countries of America, Asia and Africa, the Congo has been invaded in the last few years by the water hyacinth. Among the different factors which can explain the present distribution of the plant in the central basin of the Congo, the physico-chemical composition of the waters is the most outstanding one.

I. Physico-chemical composition of the congolese waters.

The general occurrence of humic substances of brown coloration is an important basis for the classification of the congolese waters.

I. HUMIC ACID WATERS.

Humic acid substances originating from anaerobic decomposition of vegetal material in the conditions of the swamp forests of the central basin of the Congo, are responsible for the variable acidity of the waters of this class. On the other hand, because of the extreme poverty of the soils in that region, the very weak content in mineral bases does not neutralize the humic acidity. Therefore, the acid pH of these waters (3,5-5,2) is chiefly conditioned by the humic acidity (with slight interference of carbonic acid at (pH 4,5-5,2).

The streams which are strictly limited to the central basin of the Congo belong to this class.

The homogeneity of the waters allows the establishment of some very interesting relations between different physico-chemical factors and pH.

A. — *Graph. 1* gives the relation between conductivity and the pH of the humic acid waters.

B. — *Graphs 2 and 3* show for two different sampling series the respective contributions of the acid conductivity (due to the hydrogen ion) and of the saline conductivity (due to the salts in solution) to the total conductivity. One must point out the outstanding contribution of the hydrogen ion to conductivity at low pH values, a fact responsible for the relation of total conductivity to pH being the reverse of that encountered in the classic bicarbonate waters. The weak saline conductivity of these waters, averaging 10 micromho/cm, must also be pointed out.

C. — *Graphs 4 and 5* give the relation between the true colour (Cr) and the pH. They indicate that the markedly acid waters are highly coloured (pH 3,6, true colour 430, corresponding in the HAZEN scale to more than 800 units).

D. — *Graph 6* represents the relation between the non-carbonic acidity and the pH. It clearly indicates that the acidity responsible for the low pH values is a weak acidity (humic acidity), although strong acids are presumably also present in waters below pH 4.

As other essential features of the humic acid waters, one must consider the zero alkalinity, the very low ionic content (always below 1 mg/l for the most important ions) and the proportional relationship between oxygen and pH.

The relative cationic composition of these waters seems to reflect the plant composition rather than that of soils.

As far as seasonal variations of the physico-chemical composition of humic acid waters are concerned, the most important are those affecting pH and the factors in direct relation with it : the pH being lowered during periods of heavy rains because of the washing out of humic acid substances formed in the swamp regions, and raised during relatively dry periods in the central basin.

The interpretation of seasonal variations in the mineral content is somewhat more difficult. They are related to sudden and local floods and falls in water level, and therefore affect small streams more than the important rivers with large drainage basins.

The variations from headwaters to river mouth remain to be considered. There is actually an increasing acidification downstream because of the increasing contribution of waters from the

most swampy regions which occupy the central part of the basin of the Congo.

II. HUMIC WATERS PARTIALLY NEUTRALIZED.

The humic acidity in these waters is partially neutralized by mineral bases. The pH, generally from 5 to 7, is conditioned by the degree of neutralization of the humic acidity, as well as by the dissociation of carbonic acid. The humic brown colour of these waters is very variable. The description of the mean physico-chemical composition of 3 rivers is given to illustrate the extreme and mean characteristics encountered in this class of waters, less homogeneous by far than the preceding one. The rivers of this class are generally located in the central basin, but rise in from the plateau regions.

III. HUMIC WATERS COMPLETELY NEUTRALIZED.

The humic acidity in these waters is completely neutralized by mineral bases. Beside the amount of humate, there is a variable amount of bicarbonate. Therefore this class of waters can be easily related to the classic bicarbonate waters. The rivers of this class are generally located in the plateau regions or at the beginning of their course through the central basin.

On their way through the central basin, the waters of the 2nd and 3d classes show a decreasing conductivity and an increasing colour, due to contributions of humic acid waters from tributaries there.

The Congo river illustrates very well the above classification of waters. Before penetrating into the central basin of the Congo, its waters belong to the third class. The point of penetration of the Congo river into the central basin may be located in the vicinity of Yangambi, 60 miles downstream from Stanleyville. The mixing of the Congo river waters with the humic acid waters of the large tributaries is actually a very slow process, so that the three classes of waters are present in a transverse section of the Congo river. The richer waters originating from the remote plateau regions remain in the center of the river, forming a sort of pathway between more acid humic waters (*fig. 1*).

II. Relations between the present distribution of the water hyacinth and the physico-chemical composition of the waters.

I. RESULTS OF THE 1957 PROSPECTING MISSION ON THE CONGO RIVER.

Map 1 shows the waters prospected and their classification into the different chemical classes. The water hyacinth, which has invaded the central basin of the Congo since 1955, occupies continuously the shores of the numerous islands of the Congo river. However, the plant did not invade such important rivers as the Lulonga, the Ikelemba and the Ruki, although intensive traffic which exists on these rivers must be considered as the most important factor in upstream propagation of the plant.

The presence or absence of the plant is related to the physico-chemical composition of the waters, for the humic acid waters with a pH below 4,2 constitute a markedly toxic environment for the plant. This is shown by the zones of decline of the water hyacinth along the shores of the Congo river, downstream from the points of confluence with humic acid rivers of low pH, such as the Lulonga (pH 4). Consequently, the main tributaries of the south shore, whose drainage area is strictly limited to the central basin (Lulonga, Ikelemba, Ruki), remain free of water hyacinth, whereas most of the north shore tributaries, originating from the plateau regions and belonging therefore to the 2nd and 3d classes of waters, are infested or likely to be infested by the plant on their navigable portion (Aruwimi, Itimbiri, Mongala, Ubangi).

Beside the physico-chemical composition of the waters, light seems to act as a secondary factor by accentuating the toxic effect of the humic acid waters.

II. RESULTS OF THE GENERAL INQUIRY ON THE WATER HYACINTH.

A general inquiry has been carried out in order to determine the present distribution of the water hyacinth and the physico-chemical characteristics of the waters of the principal rivers (*Map 2* and table of pH values p. 64). Considering acidity in

its relation to the growth of water hyacinth, as far as the humic acid waters are concerned, the following categories may be set up: pH toxic (pH 3,5-4,2), inhibitory (pH 4,2-4,3), doubtful (pH 4,3-4,5) and non-inhibitory (pH 4,5-5,2). On the basis of the *graphs* 8, 9 and 10, one can classify the rivers prospected as unlikely to be invaded, doubtful or liable to invasion.

The present distribution of the water hyacinth in the central basin of the Congo may then be explained by the following four factors: propagation by upstream navigation, propagation by the downstream current, inhibition of the water hyacinth by humic waters of pH 4,3 or less, artificial destruction by man.

A campaign of chemical destruction (by 2-4 D) was carried out on the Congo river as early as 1955. More than two years of long and expensive effort have proved that the complete destruction of the plant was impossible in the conditions of the central basin of the Congo.

III. Experimental study of the ecological influence of humic acid waters on the water hyacinth.

I. DETERMINATION OF THE INHIBITING FACTOR.

Two successive experiments have been undertaken under controlled conditions, in order to determine whether acidity itself may be considered as responsible for the inhibition of water hyacinth in the humic acid waters of low pH. The following treatments were carried out in each experiment:

1. "Natural" pH ≥ 5 : natural water of pH 7 (Congo river, 1st exp.) or 5 (humic acid water, 2nd exp.);

2. "Artificial" pH 4: above water acidified to pH 4 with H_2SO_4 ;

3. "Natural" pH 4: natural humic acid water of pH 4;

4. "Artificial" pH ≥ 5 : above water neutralized to pH 7 (1st exp.) or 5 (2nd exp.) with NaOH.

In the *graphs* 11 and 12 are shown the relative growths in weight and in leaf surface during the 1st and 2nd experiments.

Whereas the plant grows satisfactorily in the treatments 1 and 4 at pH 7 (1st exp.) or 5 (2nd exp.) and declines rapidly in the treatment 3 at natural pH 4, its growth is only made slower but not completely inhibited in the treatment 2 at the " artificial " pH 4.

One must come to the conclusion that if the hydrogen ion itself has indeed an unfavourable effect on the mineral absorption by the plant, a well known fact in plant physiology, that effect cannot alone explain the decline of the water hyacinth in humic acid water of low pH. That decline must be essentially attributed to a mineral deficiency : in addition to a partial physiological unavailability of the mineral ions due to the abundance of hydrogen ions in a poor mineral environment, a physico-chemical unavailability of the cations would result from their adsorption on the humic colloids. The two effects working jointly in the humic acid waters of low pH, would be responsible for the toxic effect of those waters on the water hyacinth.

A scheme of the inhibiting mechanism could be given by the formula on p. 96.

II. DETERMINATION OF THE THRESHOLD OF INHIBITING pH IN THE HUMIC ACID WATERS.

The treatments include a gradation of pH from 4 to 5 in humic acid waters. The results for these waters confirm the existence of a clearly toxic threshold for water hyacinth at pH 4,2. Above that pH, there may be an inhibiting but non-toxic pH-zone, but the evidence for this is not conclusive.

General conclusions.

Beside the conclusions directly concerning the water hyacinth, this work makes clearer the essential causes of the low biological productivity of humic acid waters, whose geographic distribution extends over a large area of the Congo basin.

SAMENVATTING

Na andere landen in Amerika, Azië en Afrika, heeft de waterhyacint ook Congo aangetast. Onder de verschillende factoren die de huidige verspreiding van deze plant in het centraal Congobekken verklaren, is de fisico-chemische samenstelling van het water wel de meest belangrijke.

I. De fisico-chemische samenstelling van de Congolese waters.

De klassificering van de Congolese waters kan voornamelijk gebaseerd worden op de algemeen voorkomende bruine humusbestanddelen.

I. ZURE-HUMUS WATERS.

De zuurtegraad der waters van deze klasse wordt bepaald door de zure humusbestanddelen, gevormd door anaerobe ontbinding van vegetatief materiaal in de moerasbossen van het centraal Congobekken. Daarenboven worden deze humuszuren niet geneutraliseerd door minerale bazen, gezien de gronden van die streek mineraal uiterst arm zijn. De zuurtegraad van bedoelde Congo-waters pH 3,5-5,2 is dan ook voornamelijk een gevolg van de humuszuren terwijl koolstofzuren de zuurtegraad licht beïnvloeden bij een pH van 4,5 tot 5,2.

Tot deze klasse behoren dan ook die stroomgebieden die alleen in het central Congobekken draineren.

De eenvormigheid van de humuswaters laat toe sommige zeer interessante relaties vast te stellen tussen verschillende fisico-chemische factoren en pH.

A. — *Kurve 1* geeft de relatie weer tussen de geleidbaarheid en de pH van de zure-humuswaters.

B. — *Kurven 2 en 3* tonen voor twee verschillende reeksen stalen, de bijdrage van respectievelijk de zuur-geleidbaarheid (bepaald door de waterstof ionen) en de zout-geleidbaarheid (bepaald door de zouten in oplossing) in de totale geleidbaarheid. Merken we de opvallende bijdrage op van de waterstofionen op de geleidbaarheid bij lage pH waarden. Hieruit blijkt dat de relatie tussen de totale geleidbaarheid en de pH in dit geval het omgekeerde is van wat vastgesteld werd in de klassieke bicarbonaat waters. Opvallend is eveneens de zwakke zoutgeleidbaarheid van deze waters, gemiddeld 10 micromho/cm.

C. — *Kurven 4 en 5* geven de verhouding weer tussen de werkelijke kleur (Cr) en de pH. Zij tonen aan dat de duidelijk zure waters sterker gekleurd zijn (pH 3,6, Cr 430, komt overeen met meer dan 800 eenheden in de HAZEN schaal).

D. — *Kurve 6* toont de relatie tussen de niet koolstof-zuurheid en de pH. Zij wijst er op dat zwakke zuren (humuszuren) verantwoordelijk zijn voor de lage pH waarden, alhoewel er waarschijnlijk ook sterke zuren aanwezig zijn in waters met pH beneden 4.

Als andere essentiële gegevens over de zure humuswaters stellen wij vast, de zero alkaliniteit, het zeer lage ionengehalte (altijd beneden 1 mg/l voor de belangrijkste ionen) en de wederkerige verhouding tussen zuurstof en pH.

De relatieve kationensamenstelling van deze waters, wordt blijkbaar veeleer door de planten dan door de grondsamenstelling weergegeven.

Wat de seizoensvariëaties van de fisico-chemische samenstelling van de zure humuswaters betreft, de belangrijkste variëaties zijn deze die de pH en de factoren in verhouding met de pH beïnvloeden. De pH daalt gedurende perioden van zware regenval door het uitspoelen van de zure humus bestanddelen gevormd in de moerasstreken en stijgt gedurende de betrekkelijk droge perioden in het centraal bekken.

De interpretatie van seizoensvariëaties in minerale samenstelling is wat lastiger. Zij staan in verband met plotse en lokale vloed en daling in het waterpeil en zijn dus meer uitgesproken in kleine dan in brede rivieren met een ruim draineringsgebied.

Blijven nog na te gaan de variëaties vanaf de bovenloop tot

aan de uitmonding van de rivier. De verzuring neemt toe in stroomafwaartse richting wegens de toenemende aanvoer van waters uit de moerassige zonen gelegen in de centrale zone van het Congobekken.

II. GEDEELTELIJK GENEUTRALISEERDE HUMUSWATERS.

De humuszuren zijn in deze klasse gedeeltelijk geneutraliseerd door minerale bazen. De pH (in het algemeen van 5 tot 7), is bepaald door de neutralisatiegraad van de humus-zuurheid, als ook door de dissociatie van koolstofzuren. De bruine humuskleur van deze waters is zeer veranderlijk. Om de uiterste en meer gemiddelde karakteristieken van deze klasse duidelijk te situeren werd een beschrijving gegeven van de gemiddelde fisico-chemische samenstelling van drie rivieren. Deze klasse is trouwens minder homogeen dan de vorige. De rivieren van deze klasse zijn in het algemeen in het centraal bekken gelegen, doch stromen hierin vanuit de plateaustreken.

III. VOLLEDIG GENEUTRALISEERDE HUMUSWATERS.

De humuszuren van deze waters zijn volledig geneutraliseerd door minerale bazen. Naast humaten vinden we er veranderlijke hoeveelheden bicarbonaten. Daarom kan deze klasse gemakkelijk vergeleken worden met de klassieke bicarbonaat-waters. De rivieren van deze klasse zijn in het algemeen in de plateau-streken gelegen of in het begin van hun loop door het centraal bekken.

Naargelang de waters van de 2^{de} en 3^{de} klasse door het centraal bekken stromen, neemt hun geleidbaarheid af en intensifieert de kleur. Dit is te wijten aan het toestromen van de zure humuswaters uit de bijrivieren van het centraal bekken.

De Congorivier zelf illustreert best onze klassificatie. Vooral eer de Congo het centraal bekken instroomt, behoort hij tot de 3^{de} klasse. Dit instromen in het centraal bekken kan in de nabijheid van Yangambi gesitueerd worden (100 km stroomafwaarts van Stanleystad). De vermenging van deze waters met de zure humuswaters der brede bijrivieren van het centraal bekken, is een zeer langzaam proces zodat men de drie klassen in een trans-

versale sectie van de Congostroom kan terugvinden. De rijkere waters van de hogere plateaustreken blijven in het midden van de stroom zoals in een dalweg tussen de meer zure humuswaters (*figuur 1*).

II. Het verband tussen de aktuele verspreiding van de waterhyacint en de fisico-chemische samenstelling van de waters.

I. RESULTATEN VAN DE PROSPECTIE-ZENDING OP DE CONGOSTROOM IN 1957.

Kaart 1 toont de geprospecteerde watergebieden en hun indeling in verschillende chemische klassen. De waterhyacint die sedert 1955 het centraal bekken van Congo aantastte, wordt steeds aangetroffen aan de oevers van de talrijke eilanden van de Congostroom. In belangrijke rivieren zoals de Lulonga, de Ikelemba en de Ruki, vindt men de plant echter niet, alhoewel het drukke verkeer op deze rivieren moet beschouwd worden als een belangrijke gunstige factor voor de stroomopwaartse verspreiding van de plant.

De aan-of afwezigheid van de plant is echter nauw verbonden met de fisico-chemische samenstelling van de waters, gezien de zure humuswaters met pH beneden 4,2 een duidelijk toxisch midden vormen voor de waterhyacint. Dit wordt best aangetoond door de zones met vermindering van waterhyacint langs de oevers van de Congo, stroomafwaarts gelegen van de instroom-punten van zure humus-rivieren met lage pH zoals de Lulonga (pH 4). De belangrijke bijrivieren die zuidwaarts instromen en waarvan de draineringsgebieden duidelijk beperkt zijn tot het centraal bekken (Lulonga, Ikelemba, Ruki), blijven dus noodzakelijkerwijze vrij van de waterhyacint. De langs het noorden instromende bijrivieren, afkomstig van hogere gebieden en dus behorende tot de 2^{de} en 3^{de} klas, worden waarschijnlijk, of zijn reeds bewoond door de plant in het bevaarbaar gebied (Aruwimi, Itimbiri, Mongala, Ubangi).

Naast de fisico-chemische samenstelling van het water schijnt het licht als een secundaire factor het toxisch effect van de zure humuswaters te versterken.

II. RESULTATEN VAN HET ALGEMEEN ONDERZOEK OP DE WATERHYACINT.

Een algemeen onderzoek werd ingesteld om de huidige verspreiding van de waterhyacint en de fisico-chemische kenmerken van het water der belangrijkste rivieren te bepalen. (*Kaart 2 en tabel der pH waarden* blz. 64). Wat betreft de relatie zuurtegraad-groei der waterhyacint en dit voor de zure humus waters, kunnen de volgende indelingen opgesteld worden ; toxisch (pH 3,5-4,2), groeibelemmerend (pH 4,2-4,3), tussenzone (pH 4,3-4,5) en niet groeibelemmerend (pH 4,5-5,2). Steunend op *kurven 9, 8 en 10*, kunnen de geprospecteerde rivieren geklassificeerd worden als waarschijnlijk niet aantastbaar, twijfelachtig of voorbeschikt voor aantasting.

De huidige verspreiding van de waterhyacint in het centraal Congobekken kan dan ook verklaard worden door de volgende vier oorzaken : voortzetting door stroomopwaarts varend verkeer, voortzetting door afwaartse stroming, belemmering door humuswater met pH 4,5 of minder, kunstmatige verdelging door de mens.

Een chemische verdelgingscampagne (door « 2-4 D ») werd sedert 1955 op de Congostroom doorgevoerd. Meer dan twee jaren lange en kostelijke arbeid hebben bewezen dat de volledige verdelging van de plant onmogelijk bleek in de omstandigheden van het centraal Congobekken.

III. Proefondervindelijk onderzoek naar de ecologische invloed van zure humuswaters op de waterhyacint.

I. BEPALING VAN DE BELEMMERENDE FACTOREN.

Twee opeenvolgende proeven werden uitgevoerd in gecontroleerde omstandigheden, met het doel te bepalen of het de zuurtegraad zelf is die verantwoordelijk kan gesteld worden voor de groeibelemmering van de waterhyacint in zure humuswaters met lage pH. De volgende proeven werden uitgevoerd :

1. — « Natuurlijk » pH ≥ 5 : natuurlijk water met pH 7 (Congostroom 1^{ste} proef) of 5 (zuur humuswater 2^{de} proef) ;

2. — « Kunstmatig » pH 4 ; water zoals hierboven, verzuurd met H_2SO_4 (zwavelzuur) tot pH 4 ;

3. — « Natuurlijk » pH 4 : natuurlijk zuur humuswater met pH 4 ;

4. — « Kunstmatig » pH ≥ 5 : water zoals hierboven tot pH 7 (1^{ste} proef) of 5 (2^{de} proef) geneutraliseerd met NaOH (natriumhydroxide).

De *kurven 11* en *12* tonen de relatieve toename in gewicht en bladoppervlakte gedurende de 1^{ste} en 2^{de} proef.

Terwijl de plantengroei voldoet onder de behandelingen 1 en 4 bij pH 7 (1^{ste} proef) en 5 (2^{de} proef), en snel vermindert onder behandeling 3 bij een pH 4 — natuurlijk midden — , is de groei slechts langzamer, doch niet volledig geremd onder behandeling 2 door de « kunstmatige » pH 4.

Bijgevolg moeten we besluiten dat, alhoewel het waterstofion op zichzelf reeds een ongunstige invloed uitoefent op de mineralenabsorptie bij de plant (een wel bekend feit in plantenfysiologie), dit verschijnsel alleen nochtans de achteruitgang van de waterhyacint in zure humuswaters met lage pH niet kan verklaren. Deze achteruitgang is essentieel toe te schrijven aan mineraalgebrek : terwijl de mineraalionen gedeeltelijk fysiologisch minder beschikbaar worden, wegens de grote hoeveelheid waterstofionen in een mineraalarm midden, worden de kationen fisico-chemisch niet meer beschikbaar gesteld wegens hun adsorptie door de humuskolloïden. Deze dubbele werking in de zure humuswaters zou dus verantwoordelijk zijn voor het toxisch effect van deze waters op de waterhyacint.

Een schematische voorstelling van dit groeiremmend mechanisme wordt weergegeven door de formule op blz. 96.

II. BEPALING VAN DE GROEIREMMENDE PH DREMPEL IN DE ZURE HUMUSWATERS.

De behandelingen verspreiden zich over een pH indeling van 4 tot 5 in zure humuswaters. De resultaten voor deze waters bevestigen het bestaan van een duidelijk toxische drempelwaarde voor de waterhyacint op pH 4,2. Boven deze pH kan er een groeibe-

lemmerende doch niet toxische pH zone zijn. Dit laatste is echter niet helemaal proefzeker.

ALGEMENE BESLUITEN.

Naast de rechtstreekse besluiten aangaande de waterhyacint, stelt dit werk duidelijker in het licht welke de essentiële redenen zijn voor de lage biologische productiviteit van de zure humuswaters waarvan de geografische verspreiding zich uitstrekt over een ruim gebied van het Congobekken.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT PROPOS	3
I. — Composition physico-chimique des eaux de la cuvette congolaise	5
1. Les eaux humiques acides	8
I. Définition	8
II. Caractéristiques essentielles	8
III. Explication des différents points cités	10
A. Teneur en matières humiques acides	10
1. Relation conductivité /pH et teneurs cationiques	10
2. Relation Couleur réelle /pH	18
3. Relation Oxydabilité /pH	20
4. Relation Acidité /pH	20
B. Teneurs minérales	22
1. Alcalinité nulle	22
2. Teneurs ioniques très faibles	22
3. Teneurs en éléments non ionisés	24
IV. Variations saisonnières de la composition physico-chimique des eaux humiques acides	25
A. Série YBI	25
B. Série EC	28
V. Variations de la composition physico-chimique des rivières humiques acides de l'amont vers l'aval	29
2. Les eaux humiques partiellement neutralisées	31
I. Définition	31
II. Caractéristiques essentielles	32
III. Description de la composition physico-chimique des différentes rivières citées	32
3. Les eaux humiques complètement neutralisées	36
I. Définition	36
II. Caractéristiques essentielles	36
III. Description de la composition physico-chimique des	

différents cours d'eau prospectés	37
Variations saisonnières de la composition physico-chimique des eaux partiellement et complètement neutralisées	40
Variations de la composition physico-chimique de l'amont vers l'aval des eaux humiques partiellement et complètement neutralisées	40
Composition cationique relative des eaux partiellement et complètement neutralisées	41
Eaux du fleuve Congo dans son trajet dans la cuvette congolaise	41
II. — Relations entre la répartition actuelle de la jacinthe d'eau et la composition physico-chimique des eaux	
1. Résultats de la mission de 1957 sur le fleuve Congo	44
I. Préliminaires	44
II. Eaux prospectées	44
III. Situation d' <i>Eichhornia crassipes</i> dans les eaux prospectées	45
IV. Analyses physico-chimiques effectuées	45
V. Classification physico-chimique des eaux prospectées	48
VI. Modes de reproduction et de propagation de l' <i>Eichhornia crassipes</i>	49
VII. Analyse des causes du non-développement d' <i>Eichhornia crassipes</i> dans certaines rivières	50
VIII. Influence des facteurs secondaires	54
IX. Détermination des périodes critiques probables pour <i>Eichhornia crassipes</i> aux confluent	57
2. Résultats de l'enquête Administration-I.N.É.A.C.	58
I. Répartition de la jacinthe d'eau dans la cuvette congolaise	59
II. Composition physico-chimique des eaux prospectées..	63
III. Seuils de pH toxique et inhibiteur du développement de la jacinthe d'eau dans les eaux humiques acides	65
IV. Classification des différents cours d'eau quant à la possibilité éventuelle d'envahissement par la jacinthe d'eau	66
V. Facteurs expliquant la répartition actuelle de la jacinthe d'eau dans le bassin congolais	72

III. — Étude expérimentale de l'influence écologique des eaux humiques acides sur <i>Eichhornia crassipes</i>	77
1. Dispositif expérimental	77
I. Traitements	77
II. Conditions expérimentales	78
2. Aspect végétatif des plants au cours des essais	81
3. Détermination du facteur inhibiteur	83
I. Premier essai	83
II. Second essai	86
III. Discussion de l'effet physiologique de l'ion H sur la croissance de la jacinthe d'eau	88
IV. Discussion de l'influence des matières humiques sur la croissance de la jacinthe d'eau	91
V. Recherche du cation le plus en cause dans le déséquilibre minéral observé aux pH faibles dans les eaux humiques acides	93
VI. Synthèse de l'effet physiologique du pH et des matières humiques acides	96
VII. Influence des matières humiques acides sur l'absorption du phosphore	97
VIII. Croissance de la jacinthe en eaux humiques acides peu renouvelées	97
4. Détermination du seuil de pH inhibiteur dans les eaux humiques acides	98
I. Critique des conditions expérimentales	98
II. Tableau des résultats	99
III. Discussion	99
CONCLUSIONS GÉNÉRALES	101
BIBLIOGRAPHIE	103
SUMMARY	105
SAMENVATTING	111
TABLE DES MATIÈRES	118

Achévé d'imprimer le 29 août 1961
par les Editions J. DUCULOT, S. A., Gembloux (Belgique).