

UNIVERSITÉ LOUIS PASTEUR - STRASBOURG I

CENTRE D'ÉTUDES ET DE RECHERCHES ECO-GÉOGRAPHIQUES  
(CEREG - URA 95 CNRS)



---

FONCTIONNEMENT HYDROCHIMIQUE  
D'UN ECOSYSTEME FORESTIER INONDABLE  
DE LA PLAINE DU RHIN:

La forêt alluviale du secteur de **l'île de Rhinau** en Alsace

---

José Miguel **SANCHEZ** PEREZ

Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg I

Spécialité: Hydrochimie Continentale \*

## RÉSUMÉ

La composition ionique des eaux souterraines - en particulier les teneurs en phosphates et nitrates - a été **étudiée** sous une forêt alluviale inondable du Rhin. Les variations constatées ont été mises en relation avec le cycle saisonnier et la typologie des forêts d'une part, les **événements** hydrologiques (inondations) d'autre part. **L'évolution comparée** des concentrations des **éléments minéraux** biogènes (N, P et K) dans les eaux souterraines montre que **l'efficacité** de **l'épuration** des **éléments minéraux** des eaux est fonction, d'une part du type de **végétation** et d'autre part des **caractéristiques** texturales et d'hydromorphie des sols.

Les résultats concernant la composition chimique des eaux souterraines permettent d'opposer trois **catégories** d'ions:

- Les ions n'entrant pas, ou très peu, dans les cycles **biogéochimiques**, tels que le bicarbonate, le chlorure et le sodium; ou largement en **excès** du fait de la géochimie des substrats concernés par rapport aux besoins des **écosystèmes** comme le calcium et le **magnésium**.

- Les ions biogènes apportés en quantité **très** importantes, par **l'intermédiaire** des **précipitations** et **dépôts** secs, pour être **intégrés** totalement dans les cycles, tel que les sulfates.

- Les ions correspondant aux **éléments** biogènes majeurs régulateurs ou limitants: nitrates, ammoniacque, phosphates et potassium, dont les concentrations, **très** faibles dans les eaux souterraines, **évoluent** fortement en relation avec le cycle saisonnier de la **végétation**.

Les crues inondantes et les apports **atmosphériques** constituent les principales sources en **éléments minéraux** externes **à l'écosystème**. Les **réserves** en **éléments biogènes** dans les sols sont faibles par rapport aux apports externes.

Les concentrations les plus faibles des **éléments** biogènes, dans les eaux souterraines et dans les sols, se trouvent dans le stade terminal de la forêt (**Quercus** - Ulmetum), le plus complexe et le plus structuré. Ces **résultats** s'expliquent par une meilleure **capacité** d'absorption de ces **éléments** grâce à une meilleure **complémentarité** dans l'espace et dans le temps du fonctionnement assimilateur de **l'écosystème**. L'étroite relation entre la diminution de la charge des **éléments** biogènes (N, P et K) et le cycle saisonnier de la **végétation** confirme cette **hypothèse** : les concentrations les plus faibles s'observent **à** la fin du cycle saisonnier.

L'analyse de **données**, les comparaisons inter-associations **végétales** et **l'évolution saisonnière** en rapport avec le cycle **végétatif**, démontrent **l'efficacité** globale des forêts alluviales dans **l'épuration** des eaux de la frange superficielle de la nappe phréatique, et des eaux de **débordement** du fleuve lors des **périodes** de crue inondante.

### Mots-clés:

Forêt alluviale, sols alluviaux, inondations, nappe **phréatique**, hydrochimie, apports atmosphériques, **éléments** biogènes, **épuration** des eaux.

# SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	iii
LISTE DE FIGURES	vi
LISTE DE TABLEAUX	viii
INTRODUCTION GENERALE	1

## Première Partie - Description du cadre physique et de l'hydrologie

CHAPITRE 1. Le cadre physique	5
1.1. La plaine du Rhin en Alsace	5
1.2. Description <b>générale</b> de la zone <b>d'étude</b> .	6
CHAPITRE 2. Le bassin du Rhin en Alsace-Bade.	9
2.1. Hydrologie <b>générale</b> .	9
2.1.1. Le <b>régime</b> des <b>précipitations</b> et le <b>rôle pondérateur</b> des lacs	10
2.1.2. Le <b>régime</b> hydrologique du Rhin <b>à la sortie</b> du bassin suisse	12
2.2. <b>L'aménagement</b> du Rhin dans la plaine d'Alsace-Bade	15
2.2.1. <b>Caractères généraux</b> des aménagements	15
2.2.2. Les incidences hydrologiques des <b>aménagements rhénans</b>	16
2.3. La nappe <b>phréatique</b> du Rhin en Alsace-Bade	17
CHAPITRE 3. Fonctionnement hydrologique du secteur de <b>l'île de Rhinau</b> et <b>particularités</b> hydrologiques de la <b>période d'étude</b>	19
3.1. Evolution historique des hauteurs d'eau <b>à l'échelle</b> de <b>Rhinau</b>	19
3.2. <b>Caractéristiques</b> hydrologiques actuelles du secteur de l'île de <b>Rhinau</b>	21
3.2.1. Structures hydrauliques et hydrologiques, <b>modalités générales</b> de l'écoulement superficiel et souterrain.	21
3.2.2. Aspects <b>spécifiques</b> du fonctionnement hydrologique du <b>système</b>	25
3.3. <b>Caractérisation</b> de la <b>période d'étude</b>	29
Conclusion de la <b>Première</b> partie	33

## Deuxième partie - Description de la **végétation** et des sols

CHAPITRE 4. La <b>Végétation</b>	35
4.1. Description <b>générale</b> de la <b>végétation</b>	35
4.2. <b>Végétation</b> et stades <b>d'évolution</b> de la forêt alluviale	36
4.2.1. Stade pionnier	36
4.2.2. Stade post-pionnier	38
4.2.3. Stade terminal	41

4.3. <b>Particularités de l'écosystème forestier inondable à bois dur</b>	41
4.3.1. Organisation de l'écosystème actuel	41
4.3.2. Cycle d'éléments biogenes dans les écosystèmes alluviaux inondables	43
4.4. Impact des inondations sur le fonctionnement écologique des forêts alluviales à bois dur	44
 CHAPITRE 5. Les sols: caractéristiques physiques, chimiques et hydrodynamiques	 47
5.1. Mise en place des dépôts alluviaux fins	47
5.2. Caractéristiques physiques des sols	47
5.2.1. <b>Propriétés</b> physiques: pH, <b>densité</b> apparente, taux de <b>matière</b> organique	47
5.2.2. Texture	49
5.2.3. <b>Résultats: caractérisation</b> des conditions de <b>dépôt</b>	49
5.3. Caractéristiques chimiques des sols	51
5.3.1. <b>Méthodes</b> d'analyses	51
5.3.2. <b>Résultats:</b> distribution verticale et <b>variabilité</b> spatiale	52
5.3.3. Analyse globale des <b>données</b>	55
5.4. Caractéristiques hydrodynamiques des sols	58
5.4.1. L'eau dans le milieu poreux: <b>présentation</b> de la <b>démarche</b>	58
5.4.2. <b>Rétention</b> hydrique	59
5.4.3. <b>Conductivité</b> hydraulique	59
5.4.4. Circulation de l'eau dans le milieu poreux	61
 Conclusion de la <b>deuxième</b> partie	 66
 Troisième Partie - Hydrochimie des écosystèmes forestiers <b>inondables</b> de la plaine du Rhin	
 CHAPITRE 6. <b>Matériel</b> et <b>méthodes</b> de <b>prélèvement</b> et d'analyse des eaux	 67
6.1. <b>Matériel</b>	67
6.1.1. Le <b>réseau piézométrique</b>	67
6.1.2. Le site <b>expérimental</b>	69
6.2. <b>Méthodes</b>	71
6.2.1. <b>Prélèvement</b> des échantillons pour l'analyse des eaux souterraines	71
6.2.2. <b>Méthode</b> de <b>prélèvement</b> des échantillons d'eau: nature et <b>périodicité</b>	75
6.2.3. <b>Méthodes</b> d'analyse	77
 CHAPITRE 7. Apports externes d' <b>éléments minéraux</b> biogenes au sein de l' <b>écosystème</b> forestier	 79
7.1. <b>Apports d'éléments</b> biogenes par les pluies et les pluviollessivats	80
7.1.1. Les <b>prélèvements</b> d'eau de pluie et de pluviollessivats	81
7.1.2. <b>Caractérisation</b> des apports <b>atmosphériques: précipitations</b> et pluviollessivats	82
7.1.3. Comparaison avec d'autres milieux forestiers	88
7.2. Apports d' <b>éléments minéraux</b> par les inondations	90
7.2.1. Evolution des concentrations en <b>éléments</b> dissous dans les eaux souterraines lors des crues inondantes	91
7.2.2. Apports en suspension	92
7.3 Conclusion	94

CHAPITRE 8. Fonctionnement hydrochimique des forêts alluviales rhenanes: Rlements majeurs	95
8.1. Caractérisation chimique des eaux : <b>méthodes d'étude</b>	95
8.2. Caractérisation chimique des eaux : <b>résultats</b>	97
8.2.1. Les types d'eau	97
8.2.2. Relations entre ions	99
8.2.3. Concentrations et origine des Alements <b>minéraux</b> dans les eaux	101
8.3. Relations entre la lithologie et la composition des eaux souterraines	106
8.3.1. Caractérisation spatiale des eaux souterraines	106
8.3.2. Relations nappe-rivière	107
8.4. Variations dans le temps de la composition chimique des eaux	110
8.4.1. Evolution a <b>l'échelle</b> de la saison	112
8.4.2. Evolution <b>à l'échelle</b> de <b>l'événement</b> hydrologique	112
8.5. Conclusion	114
CHAPITRE 9. Fonctionnement hydrochimique des forêts alluviales rhenanes: Alements biogenes	115
9.1. Introduction	115
9.2. Caractérisation chimique des eaux : Rlements biogenes	116
9.2.1. Origine des <b>éléments</b> biogènes des eaux	116
9.2.2. Concentration en <b>éléments</b> biogenes des eaux souterraines et typologie de la <b>végétation</b>	118
9.2.3. Évolution temporelle <b>liée</b> au fonctionnement hydrologique	123
9.3. Analyse globale des <b>données</b> en relation avec la typologie de la forêt	125
9.4. <b>Rôle épurateur</b> du système sol- plante, vis-a-vis des Rlements biogenes dans les eaux souterraines: N, P et K	128
9.4.1. Cas de <b>l'Azote</b>	128
9.4.2. Cas du phosphore	130
9.4.3. Cas du potassium	131
9.5. <b>Réserves d'éléments minéraux</b> dans les sols: N, P, K et S.	132
9.5.1. Concentrations en <b>éléments</b> biogenes dans les sols	133
9.5.2. Les sols comme lieu de stockage	133
9.5.3. Bilan concernant quelques <b>éléments</b> majeurs des cycles biogéochimiques: P, N et S	135
9.6. Conclusion	138
CHAPITRE 10. <b>Synthèse</b> et conclusions	141
10.1. Fonctionnement hydrochimique des <b>écosystèmes</b> forestiers inondables de la plaine du Rhin	141
10.2. Conclusions	143
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	145
ANNEXES	167

## INTRODUCTION GENERALE

Cette **étude** se place dans le contexte des recherches **menées** par le groupe Piren - Eau / Alsace (Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'**Environnement**), soutenu par le CNRS et la **région** Alsace), sur les risques de pollution de la nappe **phréatique** de la Plaine d'Alsace.

Les nappes alluviales des grandes plaines constituent une **réserve** d'eau remarquable du point de vue économique, mais dont l'importance **dépend** en grande partie de la qualité. Les **réserves** en eaux souterraines ne sont pas **inépuisables** et leur **régénération dépend** de la recharge par les eaux de surface et par les **précipitations**. Dans les conditions actuelles de pollution des eaux de surface (industrielle, atmosphérique, agricole), pollution aggravées dans les zones **très** industrialisées, les ressources en eau souterraine sont devenues **très** fragiles. Les effets potentiels des **différentes** sources de pollution peuvent être amplifiés dans les secteurs de recharge de la nappe, tout **spécialement** dans les secteurs riverains des grands fleuves.

Ces zones riveraines, **appelés** aussi **écotones**, constituent souvent des milieux forestiers **très** riches et **très** productifs du point de **vue écologique**. Il s'agit de milieux hydrauliquement connectés au fleuve, qui par leur situation **à** l'interface entre **systèmes** aquatiques et terrestres, sont étroitement dépendants des conditions hydrogeomorphologiques engendrées par le fleuve. Ces zones d'interface jouent un **rôle** déterminant dans la régulation des flux d'eau et d'éléments minéraux, car elles sont **exposées à** un apport régulier **d'énergie mécanique** et **d'éléments** nutritifs lors des crues inondantes.

Milieux restés souvent largement inondables jusqu'au milieu de ce **siècle**, ils ont perdu cette caractéristique **à** la suite des aménagements hydrauliques des plaines alluviales (**Décamps** et Naiman, 1989). Outre la destruction **systématique** des surfaces forestières alluviales des grands fleuves, en Europe, on peut dire que ces milieux riverains "fonctionnels" **fécondés** par les crues sont en voie de disparition (Wenger et al., 1990). En effet, les aménagements hydrauliques en déconnectant le fleuve de ses annexes et de son lit majeur ont fortement modifié les modalités **d'échange** entre le fleuve et les zones riveraines, et de ce fait le fonctionnement de ces interfaces.

Les effets **écologiques** des aménagements sont bien **répertoriés** dans le cas de la **vallée** du Rhin (Carbiener 1970, 1983, **1990b**; **Dister** et al., 1990; Carbiener et Tremolieres, 1990; Tremolieres et al., 1991; Hojth et al., **1991**), du **Rhône** (Pautou et Bravard, 1982; Roux, 1982; Pautou et **Décamps**, 1985; Pautou et al., 1985; Bravard et al., 1988; Amoros et al., 1988; Roux et al., 1989) de la Garonne (**Décamps** et al., 1988) et du Danube (Pecsi, 1968; Margl, 1973; Wendelberger, 1984; Ivanok et Pechinov, 1984; Penka et al., 1985; Petrasovits, 1990). Mais dans ces travaux, les modalités **d'échange** d'eau entre le fleuve et sa nappe et la circulation **d'éléments minéraux** en solution ne sont pas ou peu abordées, faute de travaux **spécifiques** relatifs **à** cette **problématique**. C'est une lacune que ce travail se propose de contribuer **à** combler.

Dans le cas de la partie amont de la plaine du Rhin en Alsace-Bade, les travaux de rectification ont, dès le milieu du XIXe **siècle**, **réduit** le cours tresse qui divaguait sur plusieurs **kilomètres**, **à** un lit majeur de 2 **à** 3 km de large limité par des digues. Dans les **années** 1950, du côté alsacien du Rhin, les travaux de

canalisation ont définitivement limitée les surfaces inondables occupées par les forêts alluviales, à quelques îles enserrées entre le vieux Rhin rectifié et un canal destiné à la production électrique et à la navigation. Côté alsacien, ces 40000 ha de forêts riveraines existant en 1840, entièrement inondables, il n'en reste aujourd'hui que 8500 ha, dont seuls 400 ha sont encore inondables, ce qui ne représente que 1% de la surface initiale.

L'intérêt de ces milieux reliques réside dans la persistance de crues inondantes. Les apports en éléments nutritifs par l'intermédiaire des eaux d'inondation, contribuent à la fertilité des zones alluviales, et favorisent le développement d'une végétation luxuriante. Il s'agit de milieux très productifs du point de vue écologique présentant une organisation structurale hautement élaborée. Ces écosystèmes atteignent souvent leur optimum tant dans le développement de la végétation (en richesse et diversité spécifique) que dans son fonctionnement (complémentarité des cycles biogéochimiques dans le temps et dans l'espace). Par exemple, on pourrait établir une comparaison avec les écosystèmes forestiers inondables de l'Amazonie, caractérisés par une richesse en espèces, une densité et une luxuriance sans égal nulle part ailleurs, et capables d'intégrer dans leur cycle biogéochimique tous les apports exogènes (Klinge et al., 1983; Sioli, 1968, 1975, 1987). Le résultat de cette efficacité écologique est répercuté dans l'extrême pauvreté en éléments minéraux des eaux souterraines qui acquièrent une pureté proche de celle d'eaux distillées (Klinge et Fittkau, 1972; Sioli, 1973, 1985).

Or dans les forêts alluviales inondables de la plaine du Rhin la complémentarité des cycles biogéochimiques est également remarquablement développée et basée sur la diversité spécifique des ligneux (Trémolières et al., 1988a, b; Schnitzler et al., 1991; soumis b). Toutefois, le fonctionnement hydrochimique (circulation d'eau et d'éléments minéraux en solution) de ces écosystèmes alluviaux de milieu tempéré reste mal connu, et notamment la composition chimique des eaux souterraines sous couvert forestier. Ces aspects seront abordés dans ce travail en essayant d'apporter une réponse aux questions suivantes:

- Comment les aménagements du Rhin ont-ils influencé le fonctionnement hydrologique et les relations nappe-rivière notamment au niveau des forêts alluviales des écosystèmes alluviaux ?
- Quelle est la composition des eaux souterraines dans les secteurs inondables occupés par la forêt alluviale et comment la végétation l'influence-t-elle ?
- Comment les apports en éléments minéraux à partir des eaux d'inondation et/ou des apports atmosphériques modifient-ils la composition des eaux souterraines ?

Le travail s'articule en trois parties:

Dans la première partie nous présenterons le cadre physique et l'hydrologie:

- le chapitre 1 décrit la zone d'étude en la replaçant dans le cadre plus global de la plaine du Rhin en Alsace-Bade.
- le chapitre 2 présente l'hydrologie du bassin du Rhin supérieur et les aménagements du lit fluvial.
- le chapitre 3 décrit le fonctionnement hydrologique et l'évolution historique des conditions hydrologiques du secteur d'étude.

La seconde partie est consacrée à l'étude des sols et de la **végétation**:

- le chapitre 4 recense la végétation, sa distribution spatiale en relation avec les modifications anthropiques et la dynamique du fleuve, ainsi que le cycle des **éléments** biogènes.

- le chapitre 5 expose la mise en place des **dépôts** alluviaux, leurs **caractéristiques** physico-chimiques et hydrodynamiques.

La troisième partie présente le dispositif expérimental et les résultats obtenus in **situ** au cours de **dix-huit** mois de mesures (mars 1989 - août 1990).

- le chapitre 6 **décrit** le dispositif expérimental et les **méthodes** de **prélèvement** et d'analyse des eaux.

- le chapitre 7 précise les apports en **éléments minéraux** (précipitations, pluviolessivats et crues inondantes) externes à **l'écosystème** et **évalue** leur importance.

- le chapitre 8 analyse l'hydrochimie globale des eaux souterraines en relation avec le fonctionnement hydrologique.

- le chapitre 9 **décrit** la composition des eaux souterraines en **éléments** biogènes par rapport à la typologie **forestière** et au cycle saisonnier de la forêt alluviale.

- le chapitre 10 est consacré à la **synthèse** des **données** et aux conclusions. Nous **présenterons** les stocks **d'éléments minéraux** dans les **différents** compartiments **étudiés** et proposerons un schéma du fonctionnement global de **l'écosystème**.



## CHAPITRE 10

### SYNTHESE ET CONCLUSIONS

#### 10.1. Fonctionnement hydrochimique des écosystèmes forestiers Inondables de la plaine du Rhin

L'étude présentée dans ce travail nous a permis de connaître le fonctionnement d'un écosystème forestier de la plaine du Rhin et de préciser:

- les mécanismes qui contrôlent la circulation d'éléments minéraux en solution,
- l'importance des apports externes à l'écosystème et leur influence sur le cycle biologique,

La figure 49 représente la synthèse de la démarche adoptée et des mécanismes qui régissent les cycles biogéochimiques de ce type de milieu.

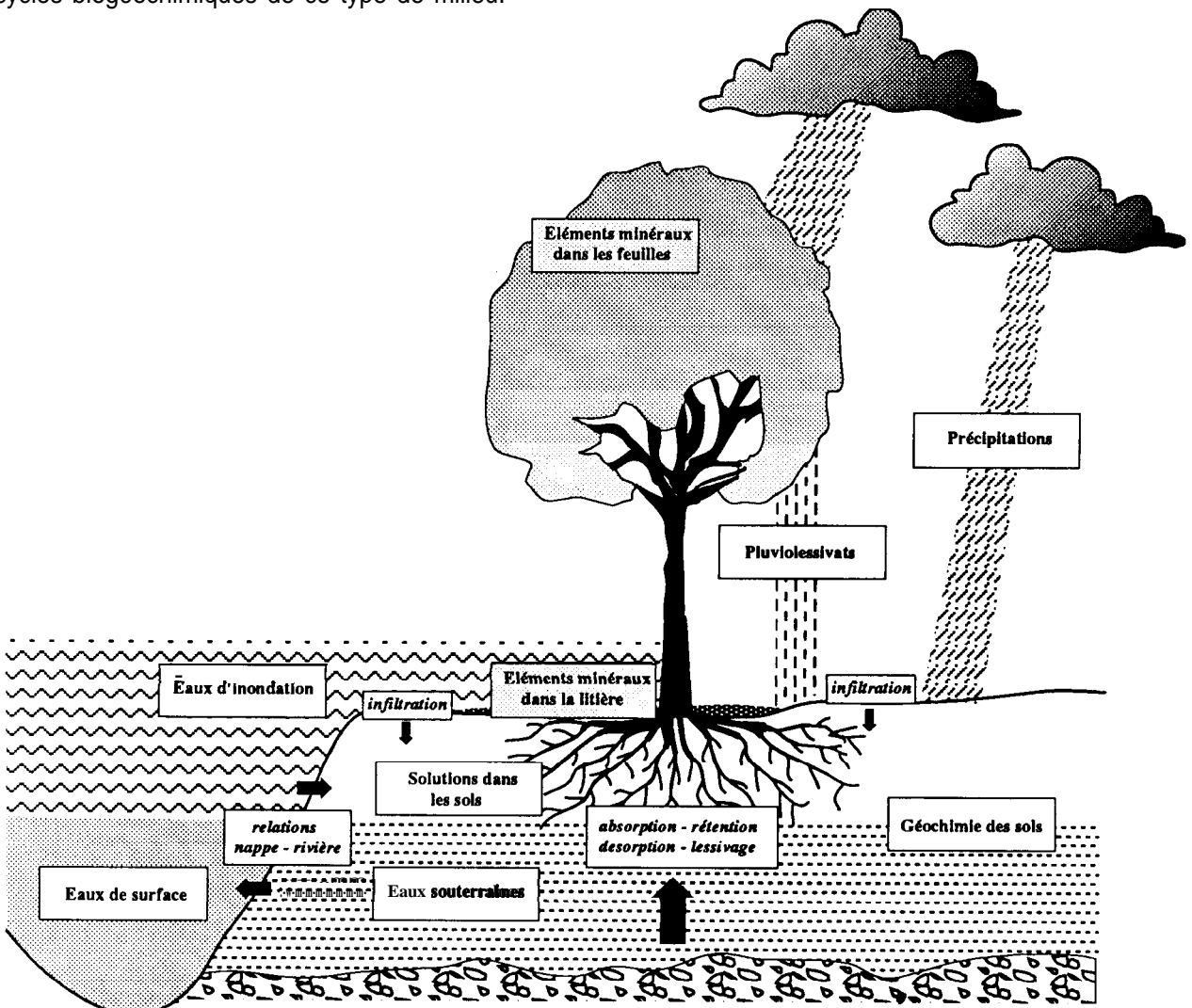
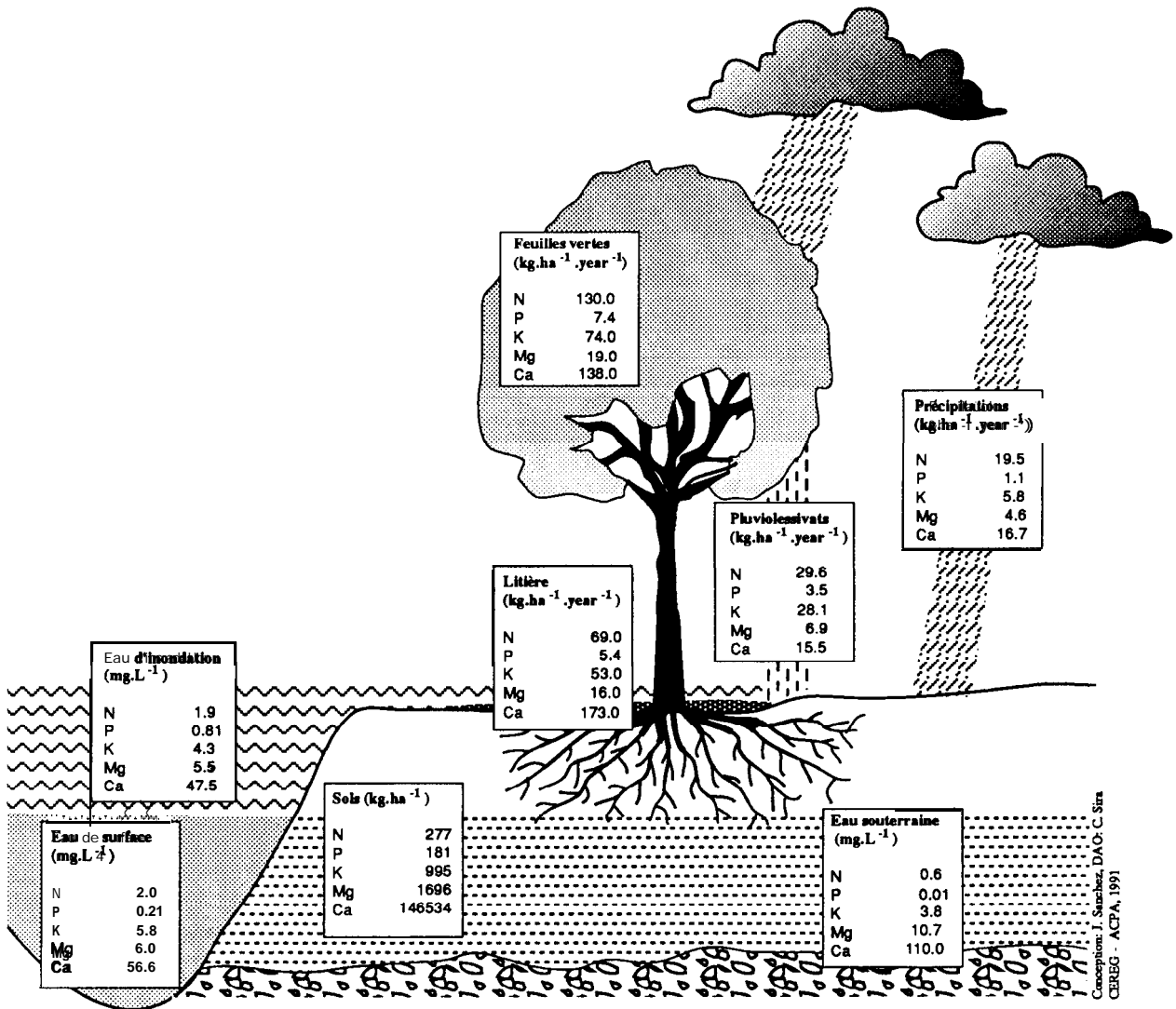


Figure 49. Cycle hydrochimique des écosystèmes forestiers inondables de la plaine du Rhin: les processus et les compartiments étudiés.

Pour comprendre le système il faut recourir aux notions de cycle biologique et de cycle géochimique **détaillées** dans ce travail. Le cycle biologique est **représenté** par l'absorption des **réserves** minérales du sol par les racines, le stockage d'une partie des éléments absorbés dans la plante et le retour d'une partie au sol par le biais de la **litière** et des pluviocessivats. Ce cycle est connecté à un autre cycle externe, géochimique, qui est **représenté** par les apports par les **précipitations** et les **dépôts** secs, les apports des eaux de surface vers les nappes (par infiltration à partir du lit ou lors des inondations) et l'absorption racinaire des éléments nutritifs directement à partir de la partie **saturée** de la nappe **phréatique**.

Une façon de contrôler le **degré** de fermeture des cycles est de quantifier chacun des compartiments. C'est ce que nous avons fait dans la figure 50, **établie** avec les **données** qui ont **été présentées** dans ce travail. Le contraste est grand entre les concentrations en éléments **minéraux** dans les eaux souterraines et les eaux de surface, surtout dans le cas du phosphore. La pauvreté en éléments **minéraux** biogènes (N, P et K) dans les eaux souterraines contraste avec les stocks dans les sols et la biomasse.



Conception: J. Sanchez, DAO: C. Sira  
CEREG - ACTPA, 1991

Figure 50. Cycle hydrochimique des **écosystèmes** forestiers inondables de la **plaine** du Rhin: stock **d'éléments minéraux** dans les **différents** compartiments.

Les réserves d'azote soluble dans le sol ne représentent que le quart des apports par la **litière** et seulement la moitié des réserves **stockées** dans les feuilles vertes. Ceci montre le rôle limitant de l'azote dans ce type de milieu, qui est confirmé par l'importance de la translocation foliaire (Schnitzler et al., soumis). Les réserves en phosphore dans la litière et les feuilles sont **très élevées** par rapport à d'autres milieux alluviaux, ce qui semble indiquer que la biodisponibilité du phosphore n'est pas un facteur limitant, **malgré** la géochimie carbonatée du substrat qui entraîne la fixation d'une grande partie du phosphore sous forme d'hydroxyapatite. En effet les conditions **d'humidité** du milieu et la **périodicité** des Apisodes de crue facilite la solubilisation du phosphore, dont la biodisponibilité est par ailleurs fortement **facilitée** par les symbioses mycorhiziques. Il semblerait donc que dans ces conditions, le facteur limitant dans la **productivité** de l'écosystème soit l'azote et non le phosphore, ceci d'autant plus que la charge phosphorée des eaux de surface est importante. **Néanmoins**, d'autres travaux de **l'équipe** (Weiss et al., 1991) ont montré que le phosphore pourrait devenir limitant dans les secteurs soustraits aux inondations.

Les fortes concentrations en calcium et en **magnésium** dans les feuilles vertes et dans la **litière** sont le **résultat** de la géochimie **carbonatée** du substrat, **caractéristique** de ce type de milieu (Pape et al., 1989).

## 10.2. Conclusions

- Les **aménagement**s du Rhin dans la plaine rhénane ont conduit à une **transformation radicale** des milieux riverains du fleuve. Le premier fait marquant est la suppression des secteurs forestiers inondables, qui aujourd'hui ne **représentent** que 400 ha, 1% des surfaces existantes en 1840. Le deuxième fait est la **réduction** du nombre **d'épisodes** réguliers de crue dans les secteurs inondables reliques.

- Les **Inondations** par l'apport régulier **d'énergie** mécanique et **d'éléments** nutritifs **contribent au** maintien du **développement** de la forêt en stades de succession et au **maintien d'une productivité** remarquable de l'écosystème. La suppression des inondations a modifié les conditions écologiques et les réserves nutritives du milieu. La richesse **spécifique**, la **diversité écologique** et les cycles biogéochimiques ont **été** fortement affectés par ces changements.

- Les **principales sources en éléments minéraux externes à l'écosystème** sont actuellement les apports **atmosphériques** et les inondations.

Les **précipitations** et les pluviollessivats représentent la source majeure de sulfates, nitrates et ammoniacale, dont l'importance **dépend** des concentrations dans les solutions et de la **quantité** de pluie. Elle peut être **considérée** comme une source en continu.

Les crues inondantes constituent la **deuxième** source en **éléments** nutritifs, phosphore, azote et potassium, mais dans ce cas leur importance dépend de la **régularité** des **épisodes** de crue. Il s'agit d'un phénomène **aléatoire** conditionné par le fonctionnement hydrologique de la zone **d'étude** et par l'utilisation de l'eau. Les conditions **d'humidité** du milieu, amplifiées lors des crues, sont à l'origine d'une stimulation bactériologique remarquable, capable de transformer et de libérer des quantités notables **d'éléments** biogènes: transformation de l'azote nitrique en azote ammoniacal, ressolubilisation du phosphore lors des modifications du potentiel redox lors des crues, etc.

- En plus des deux sources indiquées ci-dessus, **Il existe une partie non négligeable d'éléments minéraux apportés par les eaux souterraines**. Certains **éléments** dissous présents dans la composition des eaux souterraines sont le résultat de l'équilibre avec la partie fine du sol, c'est le

cas du bicarbonate et du calcium; d'autres **éléments** résultent de la pollution par les eaux de surface, c'est le cas du chlorure et du sodium, et aussi, pour partie, des phosphates transférés par les "filtrats rhénans".

- **Par comparaison avec les eaux de surface, les concentrations en éléments minéraux biogènes (N, P et K) dans les eaux souterraines montrent une forte réduction.** Cette diminution de la charge **minérale** des eaux a été expliquée comme le **résultat** de l'**épuration** par le système sol-plante. Le rôle des forêts alluviales dans l'épuration des eaux est double:

D'une part, les sols alluviaux constituent un filtre **très** efficace de rétention des apports externes, indépendamment de leur origine pour les ions ayant des affinités avec les colloïdes. D'autre part, les forêts alluviales **représentent** un **système** remarquable d'**épuration** des eaux souterraines, ce qui ressort de l'**évolution** des concentrations en **éléments** biogènes par rapport au cycle saisonnier de développement de la forêt. Ce rôle épurateur vis-à-vis des eaux souterraines est en rapport avec la structure forestière: il se **réalise** le mieux dans les stades les plus **évolués** de la forêt, démontrant ainsi le pouvoir de filtre de ce type de milieux.

- **Ce rôle épurateur** des écosystèmes forestiers inondables de la plaine du Rhin, peut être expliquée comme le **résultat d'une complexité écologique remarquable**, visualisée par le nombre d'**espèces** ligneuses et de cycles biogéochimiques, capables d'assurer l'utilisation optimale des nutriments.

Du point de vue **écologique** (diversité, **degré** de fermeture des cycles, etc), il existe une certaine analogie avec les forêts denses tropicales qui se manifeste aussi dans l'extrême propreté des eaux d'affluents de la plaine amazonienne, très pauvres elles aussi en **éléments** nutritifs (Klinge et Fittkau, 1972; Sioli, 1985).

- **Les forêts alluviales inondables de la plaine du Rhin représentent** donc, malgré les apports d'**éléments** nutritifs eutrophisés du fleuve et les pollutions **atmosphériques**, un **milieu remarquable pour la protection de la qualité des eaux souterraines**. La protection des **écosystèmes** riverains inondables des grands fleuves et toutes les actions de renaturation visant à leur protection sont tout à fait dignes d'intérêt.

- La forêt alluviale des lits majeurs des grands fleuves joue en fin de compte un **rôle** de grand **filtre régulateur**, hydrologique et biogéochimique, qui sur de longues périodes **réalise** une homéostasie des apports aux écosystèmes aquatiques connectés. Ce **rôle** de trappe à nutriments n'est évidemment pas **indéfiniment** cumulatif; la trappe **était renouvelée** normalement par les exportations de biomasse **liées** aux grandes crues, dans les **systèmes** fluviaux restés fonctionnels.

Ce travail ouvre multiples **perspectives**. Dans une **première étape** il serait judicieux de mener ce type d'**étude** sur les secteurs non inondables de la plaine du Rhin, afin de confirmer quels facteurs contrôlent le **rôle épurateur** des **écosystèmes** forestiers inondables et de quantifier l'importance des crues dans le processus épurateur. Une meilleure connaissance des flux d'eau (volume **échangé** entre le fleuve et la nappe) permettra d'**évaluer** les quantités d'eau **épurées**. La **capacité** d'absorption des **éléments minéraux** par la **canopée** peut être **évaluée** à partir de l'**étude** de la biomasse et de la **productivité** de l'**écosystème**. Il existe enfin un grand nombre de points mineurs qu'il faudra **préciser** à l'avenir, comme l'importance des processus de nitrification-dénitrification et leur **évolution** au cours de l'**année**, etc.