



BENE Kouadio Yéboi

**MODELE CONCEPTUEL DE BANDE ENHERBEE POUR LA
LUTTE CONTRE LES POLLUTIONS DES EAUX PISCICOLES
PAR LES PESTICIDES.**

MODALITES D'APPLICATION AU BASSIN VERSANT DU FLEUVE BANDAMA
EN COTE D'IVOIRE

Mémoire présenté

à l'université internationale de langue française au service
du développement africain

Université Senghor

pour l'obtention de Master en Développement

**DÉPARTEMENT ENVIRONNEMENT
(SPECIALITÉ: GESTION DE L'ENVIRONNEMENT)**

Sous la Direction de Lacina Coulibaly (Ph.D), Directeur du Laboratoire de géomatique
de l'Université de Moncton Campus d'Edmundston (CANADA)

Mémoire défendu le 26 Avril 2007

Jury: - J.P Revéret (Ph.D), Professeur à l'UQAM (CANADA) ;
- Goze Bertin BÉNIÉ (Ph.D), Directeur du Département de géomatique
appliquée de l'Université de Sherbrooke (CANADA) ;
- Dr Caroline Gallez, Directrice du Département Environnement de l'Université
Senghor (EGYPTE).

Alexandrie
Egypte

DEDICACE

- ◆ *Au Seigneur qui a pourvu à tous mes besoins ;*

- ◆ *A mes chers regrettés parents qui m'ont tant donné ;*

- ◆ *A ma tendre et bien aimée chérie Léa et à notre adorable fille
Hillary qui m'ont attendu durant ces deux ans dans l'angoisse, la
solitude mais aussi avec beaucoup d'espérance.*

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont à l'endroit de Monsieur GUEDE Behinan, Directeur Général de l'ANADER pour l'assistance qu'il a apportée à nos familles pendant ces deux années d'absence. Monsieur le Directeur soyez en infiniment remercié.

Au plan académique, toute ma gratitude à l'endroit de la doyenne Lise Caron et le Professeur Lacina Coulibaly pour m'avoir permis de réaliser mon stage à l'Université d'Edmundston au Canada dans de très bonnes conditions. Je remercie spécialement le Professeur Lacina qui m'a ouvert ses bras et son laboratoire de géomatique et qui m'a initié à la manipulation des outils géomatiques.

Pour s'être entièrement dévouée à notre formation, la Directrice du Département Environnement de l'Université Senghor, Professeur Caroline Gallez mérite tous les honneurs de ma part. Qu'elle trouve ici toute ma reconnaissance.

Sans l'appui de l'administration de l'Université Senghor avec à sa tête le Recteur Ferdinand Texier, ce travail n'aurait pas été réalisé. Qu'ils en soient sincèrement remerciés.

AVANT - PROPOS

L'Université Senghor, Opérateur Direct de la Francophonie forme des cadres africains dans les domaines prioritaires du développement africain. La gestion de l'environnement qui fait partie des sept spécialisations de cette institution est plus que jamais au centre de l'actualité. En effet l'état de l'environnement mondial est inquiétant. Au hit parade des thématiques environnementales les plus débattues se trouvent les changements climatiques et ses effets induits.

Cette tendance ne doit pas nous faire oublier d'autres menaces environnementales plus insidieuses comme la pollution des eaux de surface par les pesticides. En Côte d'Ivoire, comme dans bien d'autres pays africains, cette problématique semble être ignorée. Ce silence est propice à une contamination irréversible de l'écosystème aquatique qui constitue pourtant une ressource vitale de premier ordre.

C'est conscient de cette menace que mon choix s'est porté sur le sujet qui traite de la pollution des eaux et les outils de lutte. Ce mémoire est donc une invitation aux décideurs et gestionnaires de l'environnement de mon pays à agir pendant que la situation le permet encore.

Le traitement de ce sujet m'a conduit en stage à Edmundston au Canada où je me suis familiarisé à l'approche géomatique dans la résolution des problématiques environnementales. L'acquisition des données sur la Côte d'Ivoire et sur le bassin versant du fleuve Bandama (zone d'étude) devrait me permettre de réaliser une cartographie de la pollution. Mes demandes de données sont restées vaines. Faute de données pouvant alimenter le modèle, je me suis arrêté au stade de sa conception tout en espérant qu'au retour au pays cette importante étude pourra intéresser les futurs gestionnaires des bassins versants au point de fournir toutes les informations nécessaires à sa finalisation.

RESUME : Les eaux du bassin versant du fleuve Bandama subissent une pollution en pesticides. Des échantillons de poissons qui y sont prélevés contiennent des limites maximales de résidu de pesticides des normes européennes. Les bandes enherbées constituent des outils de lutte post application des pesticides. Leur efficacité est liée à plusieurs facteurs complexes. Cependant leur application sur le terrain ne tient toujours pas compte de cette dimension multifactorielle. La présente étude a pour objectifs d'élaborer un outil qui détermine les dimensions de la bande enherbée en intégrant plusieurs paramètres et de proposer une approche pour permettre sa meilleure intégration dans les outils de gestion du bassin versant. Un modèle conceptuel de la bande enherbée a été construit par une approche géomatique. Les principaux entrants de ce modèle sont les facteurs naturels, la pression polluante et les normes de qualité des eaux piscicoles. La largeur de la bande enherbée est le facteur sortant. Par manque de données sur le bassin versant, la construction du modèle s'est arrêtée à l'étape conceptuelle. Pour organiser l'information qui doit être générée par le modèle, l'approche « Pression - Etat - Réponse » a été proposée. Les instruments institutionnels, juridiques, économiques et informationnels qui doivent soutenir la promotion des bandes enherbées existent en Côte d'Ivoire. La contribution du modèle dans l'application effective de ces instruments a été expliquée.

Mots clés : Pesticides, pollution, bandes enherbées, modèle, géomatique, bassin versant, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT: Watershed in Bandama River suffers from pesticide pollution. Fish samples from this water contain high residues of pesticides exceeding European standards. Grassed buffer strips represent post-pesticide application control means. Their Efficiency depends on several complex factors. However, field application of such means does not always consider this multifactorial dimension. The objective of this study is to develop a tool to determine the dimensions of the grassed buffer strips through the integration of several parameters and to suggest an approach that allows its integration in the management tools of the watershed. A conceptual model for the buffer strip was conducted through a geomatic approach. The principal input factors of this model are natural factors, pollution pressure, and quality standards of the fish-breeding ponds. The width of the buffer strips is the output factor. Due to data deficiency on the watershed, the model construction stopped at the conceptual phase. In order to organize the information generated by the model, the pressure-state-response (PSR) framework was proposed. The institutional, legal, economic and informational instruments which should support the enhancement of the grass buffer strips exist in Côte d'Ivoire. The contribution of this model in the effective application of these instruments was explained.

Keywords: Pesticides, pollution, grassed buffer strips, model, geomatics, watershed, Côte d'Ivoire

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
AVANT - PROPOS.....	III
LISTE DES SIGLES ET DES ABREVIATIONS.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XIII
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE : CADRE THEORIQUE.....	6
CARACTERISATION DES PESTICIDES ET ETUDES DES BANDES ENHERBEES.....	6
I.1. Définition et caractéristiques des pesticides.....	8
I.1.1. Définition.....	8
I.1.2. Caractéristiques des pesticides.....	9
I.1.2.1. Composition des pesticides.....	9
I.1.2.2. Propriétés physico-chimiques des pesticides.....	9
I.2. Le devenir des pesticides dans l'environnement.....	10
I.2.1. Mécanisme de transfert des pesticides dans l'environnement.....	11
I.2.1.1. Volatilisation.....	11
I.2.1.2. Rétention.....	12
I.2.1.3. Dégradation.....	12
I.2.1.4. Transfert vers les eaux souterraines.....	12
I.2.1.5. Transfert vers les eaux superficielles.....	13
I.2.2. Impacts des pesticides sur la faune piscicole.....	13
I.2.2.1. Les effets directs des pesticides	13
I.2.2.2. Les effets indirects des pesticides.....	14
- Les pesticides ont également des effets néfastes sur d'autres composantes de l'écosystème aquatique, comme les mollusques, les insectes, les petits crustacés, les algues et les plantes aquatiques. L'herbicide l'atrazine aux concentrations de 1 à 5 µg/l, peut réduire la croissance des algues vertes, inhiber partiellement la photosynthèse du phytoplancton, réduire la productivité primaire, la production d'oxygène dissous et la respiration des communautés aquatiques (Richard et Giroux, 2004).....	15
CHAPITRE II : METHODES DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION DES EAUX PISCICOLES PAR LES PESTICIDES.....	16
II.1. A l'échelle internationale.....	16
II.2. A l'échelle nationale	17
II.3. Faiblesses des mesures de réduction des pollutions à la source et post pollution.....	17
II.3.1. Difficultés techniques.....	17

II.3.2. L'inefficacité du contrôle.....	18
II.3.3. L'incertitude scientifique	18
II.4. Limites des mesures de lutte après pollution.....	18
III. ETUDE DES BANDES ENHERBEES.....	19
III.1. Définition et fonction d'une zone tampon enherbée.....	19
III.1.1. Définitions.....	19
III.1.2. Fonction d'une bande enherbée.....	19
III.1.3. Choix de la bande enherbée pour zone tampon	20
III.2. Principales propriétés d'une bande enherbée déterminant le potentiel d'interception.....	20
III.2.1. La capacité d'infiltration	21
III.2.2. La capacité de sédimentation.....	22
III.2.3. La capacités d'adsorption	22
III.4. Efficacité des bandes enherbées.....	22
III.4.1. Les conditions d'expérimentation.....	23
III.4.2. Variabilité simultanée des paramètres	25
III.4.3. Formulation des résultats.....	25
III.5. Survol des méthodes pratiques d'établissement de bandes enherbées.....	25
Source : CORPEN, 1997, page 27.....	26
III.6. Conclusion partielle.....	28
DEUXIEME PARTIE : CADRE CONCEPTUEL.....	29
MODELE CONCEPTUEL DES BANDES ENHERBEES ET ORGANISATION DE L'INFORMATION.....	29
CHAPITRE IV : GEOMATIQUE : OUTILS ET DOMAINES D'APPLICATIONS	30
IV.1. Définitions de la géomatique.....	30
IV.2. But de la géomatique.....	30
IV.3. Outils de la géomatique.....	31
IV.3.1. Système d'information géographique (SIG).....	31
IV.4. Quelques applications des SIG.....	32
IV.4.1. Gestion de l'environnement et de l'agriculture.....	32
IV.4.2. Analyse des écosystèmes.....	32
IV.4.3. Analyse de pollution.....	33
CHAPITRE V : SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET MODELISATION.....	34
V.1. Différents niveaux de la modélisation.....	35
V.1.1. Niveau 1 : Monde réel.....	35
V.1.2. Niveau 2 : Niveau externe.....	35
V.1.3. Niveau 3 : Niveau conceptuel.....	35
V.1.4. Niveau 4 : Niveau logique.....	35

V.1.5. Niveau 5 : Niveau interne ou physique.....	36
CHAPITRE VI : MODELISATION DE LA BANDE ENHERBEE.....	37
VI.1. Définition des termes.....	37
VI. 1.1. La pression polluante.....	37
VI. 1.2. La vulnérabilité.....	37
VI. 1.3. Le risque.....	38
Figure 8 : Relations entre les grandes composantes du modèle.....	38
VI.2. Modélisation de la pression polluante.....	38
Figure 9 : Modèle conceptuel de la pression polluante.....	39
VI.2.1. Les propriétés du pesticide.....	39
VI.2.2. Occupation du sol.....	42
VI.2.3. Les pratiques culturales.....	42
VI.3. Modélisation de la vulnérabilité des parcelles de cultures.....	43
Figure 10 : Modèle conceptuel de la vulnérabilité des parcelles.....	43
VI.3.1. La pluie.....	43
VI.3.2. La température	44
VI.3.3. La topographie	44
VI.3.4. La pédologie.....	44
VI.4. Modélisation de la vulnérabilité du réseau hydrographique.....	45
VI.4.1. Le cours d'eau	46
VI.4.2. La zone riveraine.....	46
VI.4.3. La surface.....	47
VI.5. Modélisation conceptuelle du système (pression polluante-vulnérabilité des parcelles- vulnérabilité du réseau hydrographique).....	47
Figure 12 : Modèle conceptuel intégré.....	48
VI.6. Détermination de la largeur et localisation de la bande enherbée.....	48
Figure 13 : Schéma conceptuel de détermination de la largeur de la bande enherbée.....	49
Source : Auteur.....	50
CHAPITRE VII : STRUCTURATION ET PRESENTATION DE L'INFORMATION GRACE AU MODELE.....	51
VII.1. Processus de construction de l'information	51
Figure 14 : Organisation de l'information.....	52
Source : Adapté d' IFEN, 1999.....	52
VII.2. Définition d'un indicateur.....	54
VII.3. Caractéristiques d'un indicateur.....	54
VII.4. Approche Pression-Etat-Réponse.....	54
Figure 15 : Une représentation simplifiée de l'approche Pression - Etat - Réponse dans le cas des pollutions de l'eau provenant des activités agricoles.....	55
Source : Adapté de CORPEN, 2003.....	55
VI.5. Limites du modèle.....	57
VI.6. Conclusion partielle.....	57
TROISIEME PARTIE : CADRE D'APPLICATION DU MODELE.....	58

CONTEXTE ET MODALITES D'APPLICATION DU MODELE.....	58
CHAPITRE VIII. CONTEXTE DE L'ETUDE.....	59
VIII.1. Contexte général.....	59
Figure 16 : Principaux bassins versants de la Côte d'Ivoire.....	60
Source : MEF, 1999, p. 12.....	60
VIII.2. Contexte du bassin versant du fleuve Bandama.....	61
VIII.2.1. Définition du bassin versant.....	61
VIII.2.2. Raisons du choix du bassin versant du fleuve Bandama pour l'étude.....	61
VIII.2.2.1. Raisons opérationnelles.....	61
VIII.2.2.2. La tendance.....	62
VIII.2.2.3. Les caractéristiques propres au Bassin versant du fleuve Bandama.....	62
Figure 17 : Bassin versant du fleuve Bandama.....	63
Source : Lévêque, 1983, p. 5.....	63
VIII.2.3. Monographie du bassin versant du fleuve Bandama.....	66
VIII.3. Diagnostic de l'utilisation des pesticides en Côte d'Ivoire.....	66
VIII.3.1. La pression polluante en Côte d'Ivoire.....	66
VIII.3.1.1. Zone agro-écologique soudanaise.....	66
VIII.3.1.2. Zone agro écologique guinéenne.....	67
Figure 18 : Intensité d'utilisation des pesticides par zone agro-écologique.....	68
VIII.3.2. Etat de contamination des eaux de surface du bassin versant du fleuve Bandama.....	69
VIII.3.3. Réponse à la pollution des eaux par les pesticides en Côte d'Ivoire.....	70
VIII.3.3.1. Cadre institutionnel.....	70
VIII.3.3.2. Cadre législatif.....	72
VIII.3.3.3. Réponse technique à la pollution des eaux par les pesticides.....	73
VIII.3.3.4. Faiblesses de la réponse à la pollution des eaux de surface.....	74
CHAPITRE IX : PROCESSUS DE PLANIFICATION DE L'IMPLANTATION DES DISPOSITIFS ENHERBES.....	75
Figure 19 : Pyramide de gestion.....	75
Source : Adapté de Bénéié, 2006, p. 5.....	75
IX.1. Pyramide de gestion.....	76
IX.1.1. Planification stratégique.....	76
IX.1.2. Planification tactique.....	76
IX.1.3. Planification opérationnelle.....	77
IX.2. Contribution du modèle à la mise en œuvre des instruments de lutte contre la pollution des eaux piscicoles par les pesticides.....	77
X. RECOMMANDATIONS GENERALES.....	80
X.1. Intervention de l'Etat.....	80
X.1.1. La réglementation.....	80
X.1.2. Leviers économiques.....	81
X.1.3. La Recherche/Développement.....	82
X.1.4. La sensibilisation, l'éducation et la formation.....	83
X.1.5. Organisation institutionnelle.....	83
X.2. Les mesures de facilitation et les autres intervenants.....	84
X.2.1. L'organisation des agriculteurs.....	84
X.2.2. La participation de la société civile.....	84
X.2.3. La coopération internationale.....	85

X.3. Conclusion partielle.....	85
CONCLUSION GENERALE.....	86
LISTES DES REFERENCES.....	87
ANNEXES.....	91
ANNEXE I: Bioaccumulation du DDT.....	91
ANNEXE II : Niveau d'utilisation des pesticides par filière de production agricole.....	91
ANNEXE III : Zonation longitudinale des poissons dans le bassin du Bandama.....	92
ANNEXE IV : Eléments de biologie des principales espèces de poissons observés dans le bassin du Bandama.....	93
ANNEXE V : Les étapes de la procédure d'homologation en Côte.....	94
d'Ivoire.....	94
ANNEXE VI : Liste des matières actives et situation d'homologation en.....	95
Côte d'Ivoire.....	95
ANNEXE VII : Concentrations des ingrédients actifs herbicides détectés au cours des campagnes d'échantillonnage de l'eau de surface de 1992 à 2004 au Québec.....	96

LISTE DES SIGLES ET DES ABREVIATIONS

- ANADER** : Agence Nationale d'Appui au Développement Rural
- ANDE** : Agence Nationale de l'Environnement
- BNETD** : Bureau National d'Étude Techniques et de Développement
- CAO** : Cartographie Assistée par Ordinateur
- CIAPOL** : Centre Ivoirien Anti-Pollution
- CIDT** : Compagnie Ivoirienne pour le Développement du Textile
- CL_n** : Concentration Létale nécessaire pour tuer n% de la population considérée dans des conditions bien définies
- CNRA** : Centre National de Recherche Agronomique
- CONGACI** : Collectif des ONG actives en Côte d'Ivoire
- CORPEN** : Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'ENvironnement
- CURAT** : Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection
- DT_n** : Temps de Dégradation de la substance active = nombre de jours nécessaires pour que n % de le produit soit dégradé, exprimé en jours/heures à un pH et une température donnés.
- FAO** : Food and Agriculture Organization
- GPS** : Global Positioning System
- HCH** : Haut Commissariat à l'hydraulique
- IFEN** : Institut Français de l'Environnement
- IPH** : Indice de Probabilité d'Habitat
- K_{oc} et K_{ow}** : Coefficients de partage carbone organique/eau (oc) et octanol/eau (ow).
- LABECO** : Laboratoire d'Ecologie

LANADA	: Laboratoire National d'Appui au Développement Agricole
LERAP	: Local Environmental Risk Assessment for Pesticides
MEHA®	: Mosaïques Hiérarchisées d'Ecosystèmes Artificiels
MINAGRA	: Ministère de l'Agriculture et des Ressources Animales
MINEF	: Ministère de l'Environnement et de la Forêt
OCDE	: Organisation de Coopération et de Développement Economiques
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
PAC	: Politique agricole commune
PIB	: Produit Intérieur Brut
PNUE	: Programme des Nations Unies pour l'Environnement
RECI	: Réseau des ONG d'Environnement
SIG	: Système d'Information Géographique
UICN	: Union Mondiale pour la Nature
UNIPHYTO	: Union de la Profession Phytosanitaire
WWF	: Fond mondial pour la nature

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

- LES PESTICIDES ONT ÉGALEMENT DES EFFETS NÉFASTES SUR D'AUTRES COMPOSANTES DE L'ÉCOSYSTÈME AQUATIQUE, COMME LES MOLLUSQUES, LES INSECTES, LES PETITS CRUSTACÉS, LES ALGUES ET LES PLANTES AQUATIQUES. L'HERBICIDE L'ATRAZINE AUX CONCENTRATIONS DE 1 À 5 MG/L, PEUT RÉDUIRE LA CROISSANCE DES ALGUES VERTES, INHIBER PARTIELLEMENT LA PHOTOSYNTHÈSE DU PHYTOPLANCTON, RÉDUIRE LA PRODUCTIVITÉ PRIMAIRE, LA PRODUCTION D'OXYGÈNE DISSOUS ET LA RESPIRATION DES COMMUNAUTÉS AQUATIQUES (RICHARD ET GIROUX, 2004).....	15
SOURCE : CORPEN, 1997, PAGE 27.....	26
FIGURE 8 : RELATIONS ENTRE LES GRANDES COMPOSANTES DU MODÈLE.....	38

FIGURE 9 : MODÈLE CONCEPTUEL DE LA PRESSION POLLUANTE.....	39
FIGURE 10 : MODÈLE CONCEPTUEL DE LA VULNÉRABILITÉ DES PARCELLES.....	43
FIGURE 12 : MODÈLE CONCEPTUEL INTÉGRÉ.....	48
FIGURE 13 : SCHÉMA CONCEPTUEL DE DÉTERMINATION DE LA LARGEUR DE LA BANDE ENHERBÉE.....	49
SOURCE : AUTEUR.....	50
FIGURE 14 : ORGANISATION DE L'INFORMATION.....	52
SOURCE : ADAPTÉ D' IFEN, 1999.....	52
FIGURE 15 : UNE REPRÉSENTATION SIMPLIFIÉE DE L'APPROCHE PRESSION - ETAT - RÉPONSE DANS LE CAS DES POLLUTIONS DE L'EAU PROVENANT DES ACTIVITÉS AGRICOLES.....	55
SOURCE :ADAPTÉ DE CORPEN, 2003.....	55
FIGURE 16 : PRINCIPAUX BASSINS VERSANTS DE LA CÔTE D'IVOIRE..	60
SOURCE : MEF, 1999, P. 12.....	60
FIGURE 17 : BASSIN VERSANT DU FLEUVE BANDAMA.....	63
SOURCE : LÉVÊQUE, 1983, P. 5.....	63
FIGURE 18 : INTENSITÉ D'UTILISATION DES PESTICIDES PAR ZONE AGRO-ÉCOLOGIQUE.....	68
FIGURE 19 : PYRAMIDE DE GESTION.....	75
SOURCE : ADAPTÉ DE BÉNIÉ, 2006, P. 5.....	75

INTRODUCTION

L'histoire de l'agriculture mondiale a été marquée par la révolution verte de la période 1944-1970. Cette période a été caractérisée par un accroissement spectaculaire de la productivité agricole due à l'amélioration variétale des plantes mais aussi à l'utilisation intensive de l'irrigation et de produits phytosanitaires.

Même si cette révolution verte a permis d'éviter des famines catastrophiques en augmentant l'offre en denrées alimentaires, elle n'a pas que des effets positifs. Déjà en 1962 R. Carson dans son best seller « printemps silencieux » (Carson, 1962), attirait l'attention du monde sur les impacts des pesticides sur l'environnement. Un des écosystèmes les plus vulnérables à cette pollution d'origine agricole est sans doute le milieu aquatique. En effet l'agriculture intensive pour bénéficier de l'apport de l'eau a toujours privilégié la proximité des cours et plans d'eau. Ce voisinage constitue un facteur aggravant la pollution des eaux par les pesticides utilisée dans les cultures.

La Côte d'Ivoire, pays en voie de développement n'échappe pas à cette logique. Dans ce pays, l'agriculture joue un rôle moteur dans l'économie parce que contribuant à plus d'un tiers au PIB et employant plus de 68 % de la population active selon le Ministère de l'Agriculture et des Ressources Animales (MINAGRA, 1998). C'est une agriculture qui utilise de plus en plus de pesticides : 6.000 tonnes de consommation de pesticides en 1997 selon le MINAGRA.

Bien que n'ayant pas le niveau de pollution des eaux que connaissent les pays développés, le niveau d'alerte est atteint dans certains milieux aquatiques. En effet d'après les statistiques, 25% des pesticides utilisés en agriculture se retrouvent dans les milieux aquatiques selon le Ministère de l'Environnement et de la Forêt, (MINEF, 1999). Par ailleurs les poissons prélevés systématiquement (45 échantillons) contiennent dans tous les cas des résidus de plusieurs organochlorés tandis que deux tiers de poissons prélevés ont eu des résidus d'un ou de plusieurs organochlorés au dessus de la limite maximale (Laboratoire d'Ecologie, 1996).

L'enjeu de cette montée de la pollution des eaux est la préservation de la ressource halieutique. En effet la part du poisson dans la consommation protéique animale est estimée à 57% (MINAGRA, 1988). En 1995 la pêche continentale a apporté 11.335 tonnes de poissons pour un effectif avoisinant les 4.000 pêcheurs (MINEF, 1999).

Au moment où la faune sauvage se fait de plus en plus rare, une réduction du stock en poissons exposerait une frange de la population à un déficit en protéine animale. Une intoxication de cette ressource par les pesticides les exposerait aussi à de graves dangers de santé. La préservation de l'intégrité écologique des poissons des écosystèmes fluviaux et lacustres présente donc un double intérêt.

Pour faire face à ces périls des mesures réglementaires et techniques ont été prises. Ainsi le code de l'environnement a pris une série de mesures visant à protéger les écosystèmes aquatiques. La réglementation sur l'homologation, la distribution et l'usage des pesticides compte parmi ces mesures. La recherche et la vulgarisation agricoles à travers le Centre National de Recherche Agricole (CNRA) et l'Agence Nationale d'Appui au Développement Rural (ANADER) ne sont pas en reste. Des paquets techniques sur les pratiques agricoles moins polluantes ont été vulgarisés auprès des exploitants agricoles. D'autres mesures, comme les bandes enherbées dans les zones tampons sont appliquées ailleurs.

Problématique

En Côte d'Ivoire, les aménagements de zones tampons à effet de réduire le transfert des pesticides dans vers les milieux aquatiques n'existent pas. Pourtant certaines dispositions des codes de l'eau et de l'environnement prévoient ce type d'aménagement. Par ailleurs, scientifiques comme décideurs s'accordent à reconnaître l'efficacité des zones tampons dans la lutte contre la pollution agricole. Cependant, l'unanimité sur les largeurs efficaces de ces dispositifs et sur la méthode de leur détermination est loin d'être obtenue. En effet chaque pays ou chaque organisme définit sa propre méthode de détermination de leurs dimensions. La diversité des approches traduit sans doute la complexité des phénomènes de dispersion des pesticides mis en jeux. Elle traduit aussi la variabilité des contextes.

Dans la logique d'une application des dispositions légales concernant les zones tampons en Côte d'Ivoire, quelle doit être la méthode de détermination des dimensions de ces zones pour qu'elles jouent pleinement leur rôle ?

Une fois la méthode définie, comment l'intégrer le dispositif « bande enherbée » dans les outils de gestion du bassin versant du fleuve Bandama ?

Objectifs et hypothèses de recherche

Pour répondre aux questions ci-dessus posées, nous avons assigné un but à la présente étude qui doit permettre de réduire les risques de pollution des eaux de surface par les pesticides dans le bassin versant du fleuve Bandama. Cet but est décliné en deux objectifs spécifiques qui sont :

- élaborer un modèle qui détermine la largeur efficace de zones tampons pour lutter contre la pollution des eaux piscicoles ;
- proposer une approche pour une meilleure intégration de la bande enherbée dans les outils de gestion du bassin versant du fleuve Bandama.

Pour y arriver l'étude s'appuie sur deux hypothèses qui sont:

- les bandes enherbées des zones tampons sont des dispositifs efficaces de lutte contre la pollution des eaux par les pesticides ;
- la largeur d'une bande enherbée est l'un des facteurs clé de son efficacité.

Méthode de recherche (fig.1)

Le manque de données en format numérique (hydrologie, carte d'occupation du sol, les pratiques culturales) sur le bassin versant du fleuve Bandama nous a contraint à nous arrêter au stade conceptuel de la modélisation. L'acquisition des données plus tard débouchera sur un modèle informatique.

Ce modèle devra être d'abord calibré. Le calibrage consiste à établir des correspondances entre les données sortantes du modèle et celles du terrain. Ensuite il doit être validé à deux niveaux :

- au niveau des scientifiques : Les experts en hydrologie en écotoxicologie, en biologie et en agronomie vont s'accorder sur la justesse des paramètres utilisés et leur pondération ;
- au niveau des usagers : La validation consiste à tester le modèle et à vérifier sa pertinence et sa facilité d'emploi.

Figure 1 : Méthode de recherche

Pour résoudre la problématique, la démarche de recherche suivante a été adoptée :

Définition de la problématique de recherche : Comment définir les largeurs des bandes enherbées pour la protection de la vie aquatique contre la pollution des pesticides

Définition des questions de recherche découlant de cette problématique de recherche :

- Quels sont les impacts des pesticides sur la vie aquatique ?
- Les bandes enherbées sont-elles efficaces pour lutter contre les pollutions ?
- Quel outil adapté pour définir les dimensions des bandes enherbées ?
- Comment intégrer cet outil et les bandes enherbées dans le processus de prise de décision dans le contexte ivoirien ?

ACTIONS

Synthèse bibliographique : <ul style="list-style-type: none"> - Impacts des pesticides sur l'environnement - Méthodes de lutte contre la pollution des eaux de surface - Zones tampon - Géomatique - Monographie de la Côte d'Ivoire 	Stage <ul style="list-style-type: none"> - Lieu : Laboratoire de géomatique de l'Université d'Edmundston (CANADA) - Activité : modélisation de zone tampon pour la protection du saumon 	Rédaction du mémoire
--	--	-----------------------------

RESULTATS :

Mémoire disponible contenant :

- Un modèle conceptuel de la bande enherbée
- Un plan d'intégration du modèle et les bandes enherbées dans le processus de prise de décision dans le contexte ivoirien
- Des recommandations générales

RESTE A FAIRE

Finalisation du modèle <ul style="list-style-type: none"> • Modèle informatique • Calibrage • Validation 	Utilisation du modèle <ul style="list-style-type: none"> • Sensibilisation • Formation
--	---

Source : Auteur

Plan du mémoire

Dans une première partie théorique il sera rappelé le phénomène de pollution des eaux par les pesticides et les différents moyens de lutte développés. On évoquera surtout les approches de détermination des zones tampons et ses insuffisances.

A la lumière de l'état de l'art dans le dimensionnement des zones tampons, nous présenterons dans une seconde partie conceptuelle, un modèle de détermination des largeurs de ces zones.

La dernière partie décrira et analysera la situation en Côte d'Ivoire. Elle présentera les conditions d'intégration de ce modèle et de la bande enherbée dans les outils de gestion du bassin versant du fleuve Bandama.

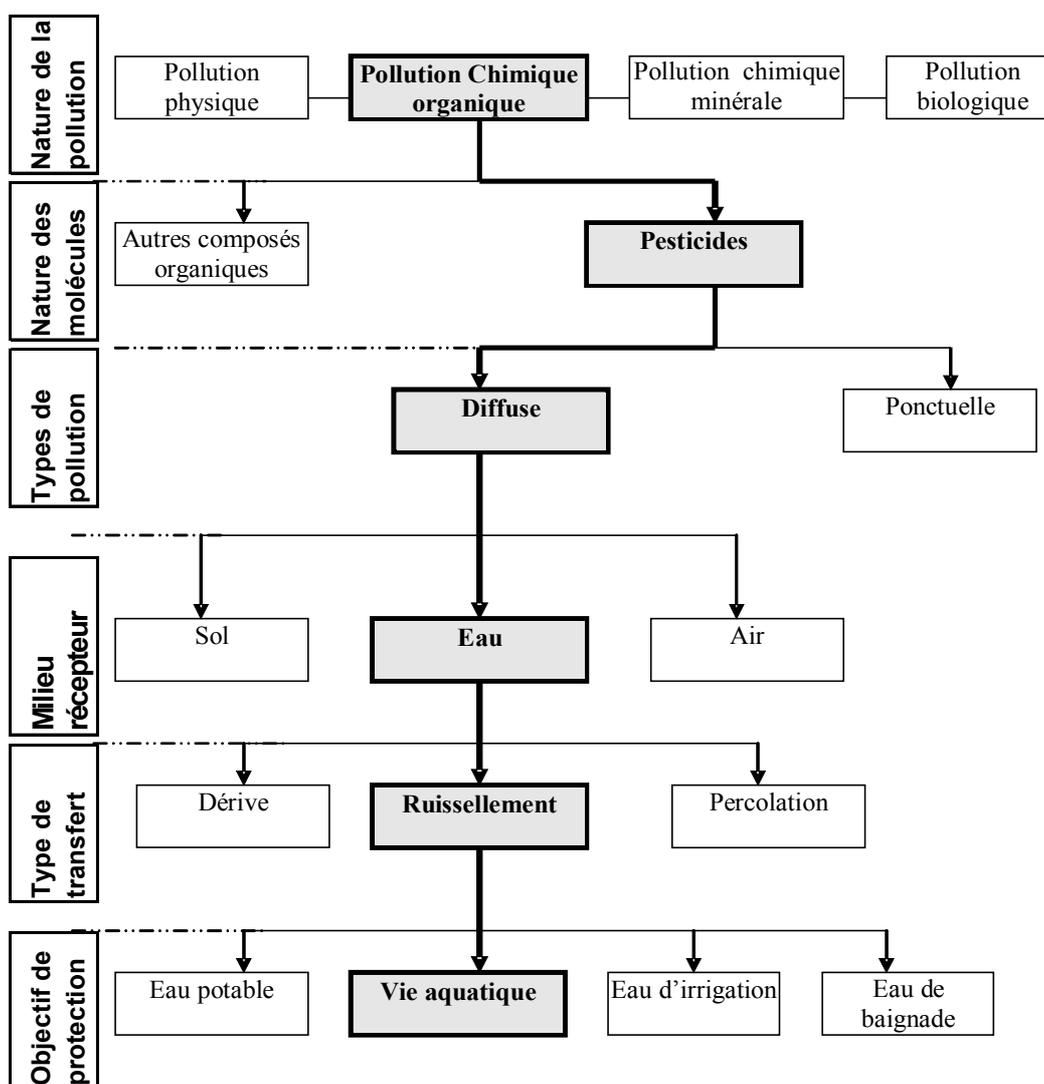
PREMIERE PARTIE : CADRE THEORIQUE
--

**CARACTERISATION DES PESTICIDES ET ETUDES DES
BANDES ENHERBEEES**

CHAPITRE I : CARACTERISATION ET DEVENIR DES PESTICIDES DANS L'ENVIRONNEMENT

La présence des pesticides dans le milieu naturel a une origine uniquement anthropique, contrairement aux composants des engrais, comme l'azote ou le phosphore, qui font partie des cycles biogéochimiques naturels. Dès lors qu'il y a présence de pesticides dans l'environnement, il y a perturbation de son équilibre (Ramade, 1992) et répercussion potentielle sur la santé des espèces animales et végétales. La pollution engendrée par les pesticides est appelée pollution chimique organique ou pollution secondaire (Radoux, 2006). La présente étude ne traite pas de tous les aspects de la pollution secondaire. Le schéma ci-dessous (fig.2) indique les limites de l'étude.

Figure 2: Schéma illustrant la délimitation du champ de l'étude



Source : Auteur

I.1. Définition et caractéristiques des pesticides

I.1.1. Définition

Plusieurs termes et expressions définissent les pesticides. Ainsi, produits phytosanitaire, produits anti-parasitaires à usages agricoles, produits pour lutter contre les ennemis des cultures, produits de protection des plantes, produits agri-sanitaires, produits agro-pharmaceutiques, produits phytopharmaceutiques sont les autres dénominations de ce terme. Dans la suite du document, il sera généralement employé le terme anglais courant pesticides ou produits phytosanitaires sans aucune distinction.

En 1989, le Décret 89-02 du 4 Janvier 1989 relatif à l'Agrément, la Fabrication, la Vente et l'Utilisation des Pesticides en Côte d'Ivoire définit les pesticides comme suit:

- Toute substance ou association de substances destinée soit à repousser, détruire ou combattre les ravageurs, les vecteurs de maladies humaines ou animales et les espèces indésirables de plantes ou d'animaux causant des dommages ou se montrant autrement nuisibles durant la production, la transformation, le stockage, le transport ou la commercialisation des denrées alimentaires, des produits agricoles, du bois et des produits ligneux ou des aliments pour animaux, soit à être appliqué sur les animaux pour combattre les insectes, arachnides et les autres ecto-parasites.
- Les régulateurs de croissance des plantes, les défoliants, les dessiccateurs, les agents d'éclaircissage des fruits, les agents destinés à empêcher la chute prématurée des fruits, les substances appliquées sur les cultures soit avant, soit après la récolte, pour protéger les produits contre la détérioration durant l'entreposage et le transport. Dans la présente étude l'usage des pesticides est exclusivement agricole.

I.1.2. Caractéristiques des pesticides

1.1.2.1. Composition des pesticides

Sous sa forme commerciale, un pesticide est composé de substance(s) active(s) et d'adjuvants. Les adjuvants sont l'ensemble de produits utilisés pour sécuriser, faciliter l'utilisation et renforcer l'action de la (des) substance(s) active(s) : Ce sont des solvants, stabilisants, colorants, vomitifs.

Les substances actives sont de natures très diverses : composés minéraux (soufre, sulfate de cuivre), molécules organiques naturelles (nicotine, pyréthrine) et molécules organiques de synthèse (carbamates, urées substituées, triazines, organophosphorées...). Les pesticides regroupent plus de 900 molécules différentes participant à la fabrication d'environ 8000 spécialités commerciales (Domange, 2005). La plupart des pesticides actuellement utilisés sont des substances de synthèse.

1.1.2.2. Propriétés physico-chimiques des pesticides

Les propriétés des pesticides qui gouvernent leur devenir dans l'environnement sont ci-dessous décrites.

La volatilité appréciée par la constante de Henry (H-constante), correspond à la pression de vapeur d'une substance. La volatilité traduit l'affinité d'un composé vis à vis de la phase gazeuse. Les pesticides volatiles peuvent se répandre largement dans l'environnement.

La solubilité dans l'eau indique la possibilité d'un composé à se retrouver dans la phase aqueuse aussi bien dans la zone saturée que non saturée d'un sol. Elle traduit l'affinité d'un composé vis à vis de la phase aqueuse : Cette propriété est utile pour déterminer le partage, la mobilité et le devenir du pesticide dans l'environnement. Selon Radoux, les pesticides appliqués à l'état de poudres mouillables présentent des entraînements plus élevés (2 à 5%) que ceux qui sont peu solubles dans l'eau (moins de 1% de perte).

La persistance appréciée par la DT_{50} caractérise la capacité du produit à persister dans le sol dans des conditions pédoclimatiques données. Plus cette présence est longue, plus la possibilité d'un transfert est importante. Celle -ci est exprimée en jours.

Le coefficient de partage carbone organique-eau (Koc) représente la tendance qu'a le produit à se fixer sur le complexe argilo-humique et à ne pas passer dans la solution du sol. Un produit caractérisé par un Koc élevé est fortement adsorbé par les colloïdes du sol, ainsi il aura moins tendance à être entraîné par les eaux de ruissellement.

Le coefficient de partage dans l'octanol et l'eau (Kow) constitue le rapport de la concentration d'un pesticide dans l'octanol à la concentration de ce même pesticide dans l'eau à l'équilibre dans une solution diluée. Plus le Kow d'une matière active est élevé, plus la matière active est lipophile, et plus elle aura tendance à se fixer dans les graisses animales ou végétales. On parle de bioaccumulation ou de bioconcentration de la matière active dans la chaîne alimentaire.

La toxicité représentée par la Concentration Létale (CL_n) est souvent utilisée pour caractériser un pesticide. C'est la concentration d'un produit toxique qui entraîne la mort d'un pourcentage n dans une population donnée, pendant un temps donné, dans une expérience donnée. Plus la CL_n est élevée moins le produit est toxique.

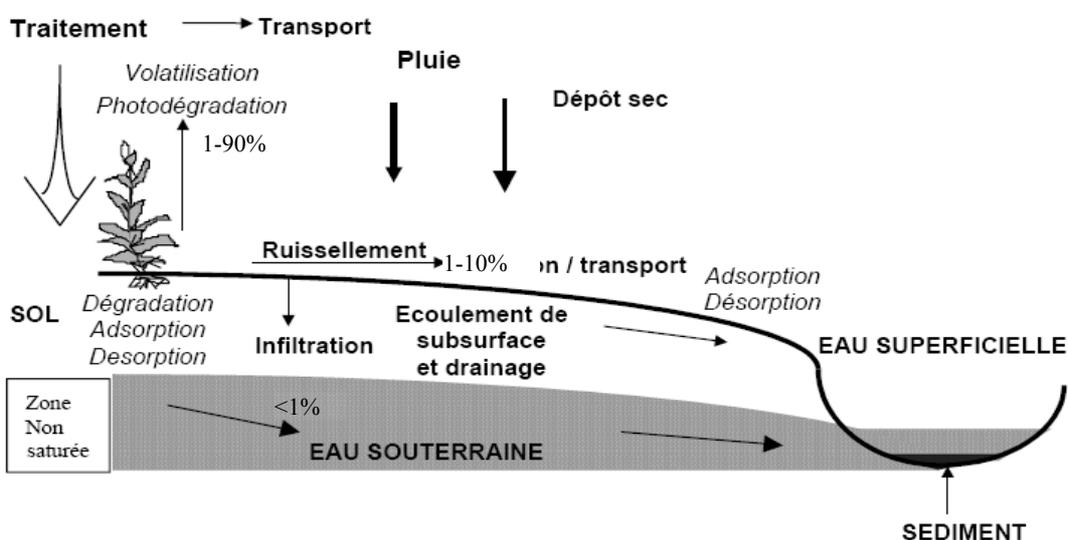
I.2. Le devenir des pesticides dans l'environnement

Selon les définitions du Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement (CORPEN, 1993), on doit distinguer les pollutions diffuses, liées aux traitements des champs, des pollutions ponctuelles, considérées en majorité comme accidentelles. Dans cette partie, nous nous limiterons à l'étude qui porte sur les pollutions diffuses des pesticides qui se dispersent dans les trois compartiments de l'environnement : l'air, le sol et l'eau. Nous exposons aussi les impacts des pesticides sur la vie aquatique plus précisément sur les poissons.

I.2.1. Mécanisme de transfert des pesticides dans l'environnement

Les mécanismes qui gouvernent le devenir des pesticides peuvent se classer en trois types : rétention, dégradation, transfert (fig.3). Dans le cas du transfert vers l'atmosphère, le terme de volatilisation est utilisé ; les transferts vers les eaux souterraines et vers les eaux de surface sont séparés même si le cycle hydrologique montre que ces deux types d'écoulement sont intimement liés. Sans prétendre détailler l'état exhaustif de leur connaissance, les processus mis en jeu sont définis dans cette partie.

Figure 3 : Mécanisme de transfert des pesticides dans le milieu aquatique



Source : CORPEN, 1993, p.22

I.2.1.1. Volatilisation

Selon Colin (2000), ce mécanisme traduit le départ de produits phytosanitaires dans l'atmosphère ; il faut cependant distinguer les pertes se produisant au moment de l'épandage dues à l'entraînement par le vent ou « dérive », des pertes intervenant à partir des résidus de molécules dans le sol. Dans le cas de la dérive, le transfert vers

l'atmosphère est sous l'influence des conditions climatiques lors de l'épandage, de la formulation chimique du produit et des techniques et matériels d'application, les conditions les plus défavorables d'épandage par aéronef pouvant engendrer des pertes de plus de 50%. Une fois le produit à la surface du sol et des plantes, il peut se produire une évaporation. Ce processus est très marqué sur un sol mouillé, le produit étant alors entraîné avec l'eau qui s'évapore par co-distillation, et cesse en conditions de sol sec.

I.2.1.2. Rétention

La rétention est le transfert d'un composé de la phase liquide ou gazeuse vers la phase solide imputable à des phénomènes réversibles, appelés sorption, ou irréversible. L'adsorption, se définit comme la fixation physico-chimique de composés en solution sur les agrégats du sol. Elle est en partie réversible en fonction de la concentration du soluté et des conditions du milieu, notamment le pH d'après Colin.

I.2.1.3. Dégradation

Dès leur application, les produits phytosanitaires subissent des processus biotiques et abiotiques qui amènent à leur dégradation plus ou moins complète. Ces mécanismes ont lieu dans l'air, le sol, l'eau et les sédiments. La principale transformation d'ordre physique est la photo-décomposition par les rayonnements ultraviolets. Le résultat de ces réactions est le plus souvent une oxydation de la molécule. La réaction de dégradation chimique dominante est l'hydrolyse en phase aqueuse et aux interfaces entre phases. Ces réactions peuvent être liées au pH ou indépendantes, et catalysées par les systèmes d'oxydo-réduction du sol. Les paramètres qui favorisent le développement bactérien accélèrent les processus de biodégradation : pH, température, aération, humidité. La présence de matières organiques, qui par ailleurs contribuent à la rétention des produits, en tant que substrat, joue un rôle moteur de la dégradation biotique d'après Colin.

I.2.1.4. Transfert vers les eaux souterraines

Selon Colin, le transfert vers les eaux souterraines concerne les molécules en solution et celles mobilisées par la désorption et la dissolution. Le transfert est représenté par le

passage des composés phytosanitaires de la zone non saturée comprenant le sol à la zone saturée ou zone aquifère. Ce passage se fait par convection dans la phase liquide essentiellement, mais aussi dans la phase gazeuse si le produit est très volatile, et par diffusion dans le sol. La part de la diffusion diminue devant celle de la convection quand la vitesse d'écoulement dans le sol devient grande. D'une manière plus globale, la percolation de l'eau dans le sol entraîne la lixiviation des molécules phytosanitaires, fonction des caractéristiques du produit, des propriétés du sol, de la vitesse d'infiltration et de l'épaisseur de la zone non saturée. La rétention et les processus de dégradation limitent ce type de transfert.

I.2.1.5. Transfert vers les eaux superficielles

Comme pour les eaux souterraines, le transfert vers les eaux superficielles comprend une phase d'extraction des produits par diffusion, désorption, et dissolution ; il s'y ajoute les mécanismes dus à l'érosion et l'entraînement des particules du sol sur lesquelles sont retenus les composés phytosanitaires. L'eau est le moteur de ce type de transfert avec une composante de surface, le ruissellement, une composante latérale, l'écoulement hypodermique, et une composante verticale, le transfert vers les nappes.

L'étude du devenir des pesticides dans l'environnement présente un intérêt : celui de la préservation des écosystèmes aquatiques. Pour gagner en efficacité dans leur préservation il faut connaître les impacts causés à cette ressource.

I.2.2. Impacts des pesticides sur la faune piscicole

On distingue deux types d'effets des pesticides sur la faune piscicole : effets directs et effets indirects.

I.2.2.1. Les effets directs des pesticides

Les effets des pesticides sur les poissons sont de différentes natures : mort subite, atteinte à la fertilité, malformations, baisse des défenses immunitaires. Les pesticides sont susceptibles d'engendrer des toxiques létaux sur une grande partie des espèces de poissons. Les organochlorés ont une forte rémanence et une toxicité aigue et chronique

élevée. Même à des concentrations inférieures au micro gramme par litre, la toxicité des organochlorés reste aigue pour des poissons. Les organophosphorés ont une toxicité aigue moindre que celle des organochlorés. Les stades larvaires et juvéniles sont les plus sensibles chez les poissons.

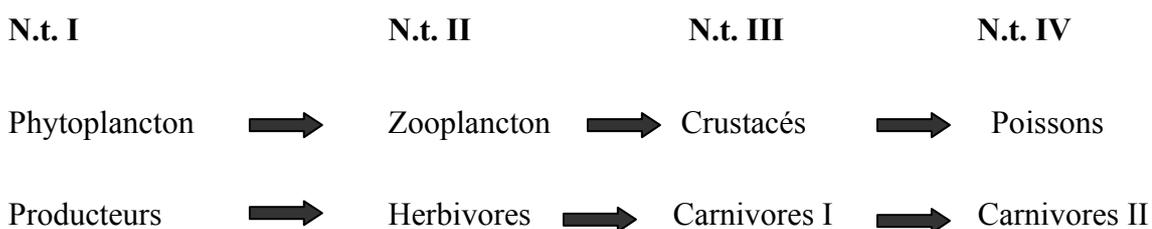
Les effets létaux varient en fonction de la spécificité physico-chimique des substances, des espèces exposées et des durées d'exposition. Musanhi Gurure, (1987) a découvert que le Thiodan à une concentration de 0,001 ppm est mortel pour le poisson alors qu'il faut une concentration de 0,125 au Lindane pour le même effet. Il a d'ailleurs précisé que l'*Oreochromis niloticus* est 1,7 fois plus résistant au Thiodan que le *Tilapia zillii*. Les effets subletaux se manifestent par le dérèglement de la dynamique de reproduction des populations et des changements comportementaux chez certaines espèces. Kulshretha et al, (1984) ont découvert que l'Endosulfan et le Carbaryl ont réduit le nombre d'oocytes, leur taille et ont également endommagé des vésicules.

I.2.2.2. Les effets indirects des pesticides

Des effets indirects des pesticides s'observent dans de nombreux cas, parmi lesquels nous citerons surtout :

- la réduction des disponibilités alimentaires. Les herbicides ont un pouvoir destructeur de la flore et de la faune aquatiques qui constituent pour le poisson une source alimentaire. La destruction de la faune et de la flore aquatiques est une menace à la vie du poisson ;
- la contamination de la chaîne alimentaire. La consommation répétée de proies intoxiquées conduit à la concentration de certains pesticides non biodégradables dans l'organisme des prédateurs, qui s'intoxiquent à leur tour ; c'est le phénomène de la bioaccumulation illustré sur la figure 4 et en annexe I.

Figure 4 : Evolution de la concentration de pesticides dans les réseaux trophiques



N.t. : niveau trophique

Source : Adapté de Ramade, 1989

- Les pesticides ont également des effets néfastes sur d'autres composantes de l'écosystème aquatique, comme les mollusques, les insectes, les petits crustacés, les algues et les plantes aquatiques. L'herbicide l'atrazine aux concentrations de 1 à 5 µg/l, peut réduire la croissance des algues vertes, inhiber partiellement la photosynthèse du phytoplancton, réduire la productivité primaire, la production d'oxygène dissous et la respiration des communautés aquatiques (Richard et Giroux, 2004).

Les pesticides constituent une réelle menace sur la faune piscicole. Ils affectent leur intégrité physiologique et écologique. La santé humaine est directement ou indirectement liée à la qualité des ressources piscicoles. Conscients de ces enjeux, de nombreux outils de lutte contre la pollution des eaux ont été élaborés à travers le monde.

CHAPITRE II : METHODES DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION DES EAUX PISCICOLES PAR LES PESTICIDES

La lutte contre la pollution est un des points les plus importants d'un schéma de gestion intégrée des ressources en eau. Au niveau international, des organismes spécialisés des Nations Unies tels que le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), l'Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation (FAO) et l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) participent activement à lutte contre la pollution des eaux par les pesticides. Des organisations non gouvernementales (ONG) telles que Greenpeace, et l'Union Mondiale pour la Conservation de la Nature (UICN) y contribuent aussi.

II.1. A l'échelle internationale

Deux importantes conventions internationales apportent un appui à cette lutte :

- **La Convention de Stockholm** sur les polluants organiques persistants qui est un instrument juridiquement contraignant permettant de réduire, voire éliminer la production, l'écoulement, l'utilisation et le stockage des polluants organiques persistants.

- **La Convention de Rotterdam**. Cette Convention porte sur le consentement préalable en connaissances de causes applicable à certains produits chimiques et pesticides dangereux qui font l'objet d'un commerce international. Elle a pour but d'encourager le partage des responsabilités et la coopération entre les Parties, s'agissant du commerce international de certains produits chimiques dangereux, afin de protéger la santé humaine et l'environnement contre tout danger potentiel et de contribuer à leur utilisation écologiquement rationnelle.

II.2. A l'échelle nationale

Trois types de mesures sont généralement appliqués à cette échelle :

- **Les mesures de réduction des pollutions à la source** ou réduction de leur production (politique d'homologation, politiques de fixation de prix des pesticides, techniques culturales appropriées) ;
- **Les mesures de réduction des pollutions après collecte** (traitement tertiaire des effluents, zones tampon) ;
- **Les mesures pour augmenter le potentiel d'assimilation des ressources en eau** (dilution, mélange, ré-oxygénation).

A ces mesures on peut adjoindre les « Mosaïques Hiérarchisées d'Ecosystèmes Artificiels ou MEHA® » qui constituent des technologies naturelles d'épuration des eaux usées domestiques et urbaines. L'épuration en plantations ligneuses ou herbacées fait partie du volet agricole de ces technologies. Toutes ces mesures visent à atteindre des normes compatibles à la vie aquatique (annexe VIII).

II.3. Faiblesses des mesures de réduction des pollutions à la source et post pollution

II.3.1. Difficultés techniques

Les mesures de réduction de la pollution à la source proposent des "techniques alternatives" à l'emploi des pesticides. Mais les exploitants agricoles veulent que ces techniques soient aussi faciles à utiliser, efficaces et bon marché que les traitements phytosanitaires, plus durables techniquement et qui ne remettent pas en cause leurs objectifs de rendement élevé. Or il n'existe aucune technique répondant à ce cahier des charges. Les techniques basées sur l'utilisation de variétés totalement ou partiellement résistantes, la lutte biologique, le travail du sol, le désherbage mécanique ou thermique, ont une efficacité partielle. Elles permettent un contrôle des bio-agresseurs à condition d'être utilisées en combinaison et associées à des choix de systèmes de culture et de gestion des états de la culture qui réduisent les risques de développement des bio-agresseurs.

II.3.2. L'inefficacité du contrôle

Dans les pays en développement, plusieurs molécules de pesticides échappent au contrôle de l'administration. Des agriculteurs continuent d'appliquer certains produits non homologués. La porosité des frontières africaines, la non harmonisation des législations sur les pesticides encouragent l'usage des pesticides prohibés.

II.3.3. L'incertitude scientifique

Les incertitudes liées au devenir de certains pesticides dans l'environnement demeurent. Certains pesticides homologués aujourd'hui pourraient perdre cet avantage lorsqu'une connaissance approfondie de leur devenir les classerait dans la catégorie de produits dangereux. En d'autres termes certains pesticides utilisés aujourd'hui pourront être interdits à l'avenir. Selon Radoux, l'épuration en plantations ligneuses qui fait partie des MEHA® est encore trop peu connue et les critères de dimensionnement et de gestion sont encore imprécis.

II.4. Limites des mesures de lutte après pollution

Il n'est pas rentable ni préférable pour l'environnement d'attendre de traiter l'eau après qu'elle soit polluée. La construction et l'exploitation d'une installation de traitement de l'eau coûtent cher, surtout pour les pays en développement. De plus, l'effet cocktail de plusieurs molécules de pesticides est parfois imprévisible et source de toxicité élevée. Dans ce cas, même le système le plus efficace ne peut pas contrôler ou enlever tous les polluants chimiques, et les procédés de dépollution ne sont pas sans nuisance pour l'écosystème aquatique.

Face à ces insuffisances, les mesures de réduction de la pollution après collecte (bandes enherbées) constituent une voie à explorer pour améliorer la qualité des eaux de surface.

III. ETUDE DES BANDES ENHERBEES

Les bandes enherbées font partie de la famille des zones dites tampon. De nombreux pays et organismes du Nord, recommandent des zones tampons dans les milieux agricoles. De nombreuses études sur l'efficacité de ces zones à lutter contre les pollutions ont été faites. Dans cette partie les facteurs déterminant l'efficacité des zones tampon sont expliqués. Les méthodes de leur établissement sont aussi étudiées pour en dégager les faiblesses.

III.1. Définition et fonction d'une zone tampon enherbée

III.1.1. Définitions

Une zone tampon est un espace qui se trouve en bordure des cours d'eau et des lacs et qui bénéficie d'un degré de protection (Wenger, 1999). Le terme tampon est utilisé à cause de ses fonctions de protection des cours d'eau contre les activités anthropiques. Des synonymes sont rencontrés dans la littérature spécialisée : zone riveraine de conservation, bande tampon ripisylve, corridor de protection des cours d'eau, etc.

En agriculture, les spécialistes utilisent d'autres termes spécifiques mais aussi synonymes de zone tampon : bande tampon enherbée, ou bande filtrante enherbée sont utilisés pour désigner les bandes d'herbes installées en aval des parcelles de culture pour réduire le volume, la concentration et la propagation du flux polluant vers les cours d'eau. Dans le contexte de cette étude nous utiliserons variablement les termes « bande enherbée » ou « bande tampon enherbée » pour désigner toute surface en herbe en position de jouer ce rôle d'interface entre les parcelles cultivées et les cours d'eau.

III.1.2. Fonction d'une bande enherbée

Selon Wenger, en plus d'intercepter et de réduire les quantités de pesticides qui vont dans les cours d'eau, les bandes enherbées jouent d'autres fonctions :

- intercepter et réduire les sédiments lors des ruissellements ;

- intercepter et éliminer les éléments fertilisants (phosphore, nitrate) qui sont à la base de l'eutrophisation des plans d'eau ;
- stabiliser les berges des cours d'eau ;
- réguler les flux de ruissellement pour éviter les inondations soudaines ;
- améliorer le micro-climat des berges (herbes à forte densité et de grande taille) ;
- améliorer l'aspect visuel des berges.

III.1.3. Choix de la bande enherbée pour zone tampon

Une zone tampon est caractérisée par sa couverture végétale. Les zones tampon peuvent être arborées, enherbées ou nues. Celles qui sont nues sont inefficaces dans la rétention des pesticides. Quant aux zones tampon arborées elles présentent certaines faiblesses qui sont :

- le coût élevé de mise en place des arbres ou arbustes par rapport aux herbes qui poussent naturellement dans certaines conditions. Quelques mois suffisent seulement aux herbes pour jouer leur rôle d'épuration alors que les arbres demandent quelques années ;
- la faible densité racinaire en comparaison aux herbes qui ont une forte densité racinaire. Or le pouvoir de rétention des pesticides est lié à la présence et à la densité des racines dans le sol ;
- la régénération plus lente des espèces arborées après quelques événements nuisibles (feu de brousse, inondation, brout des animaux). Les herbes s'en accommodent relativement bien.

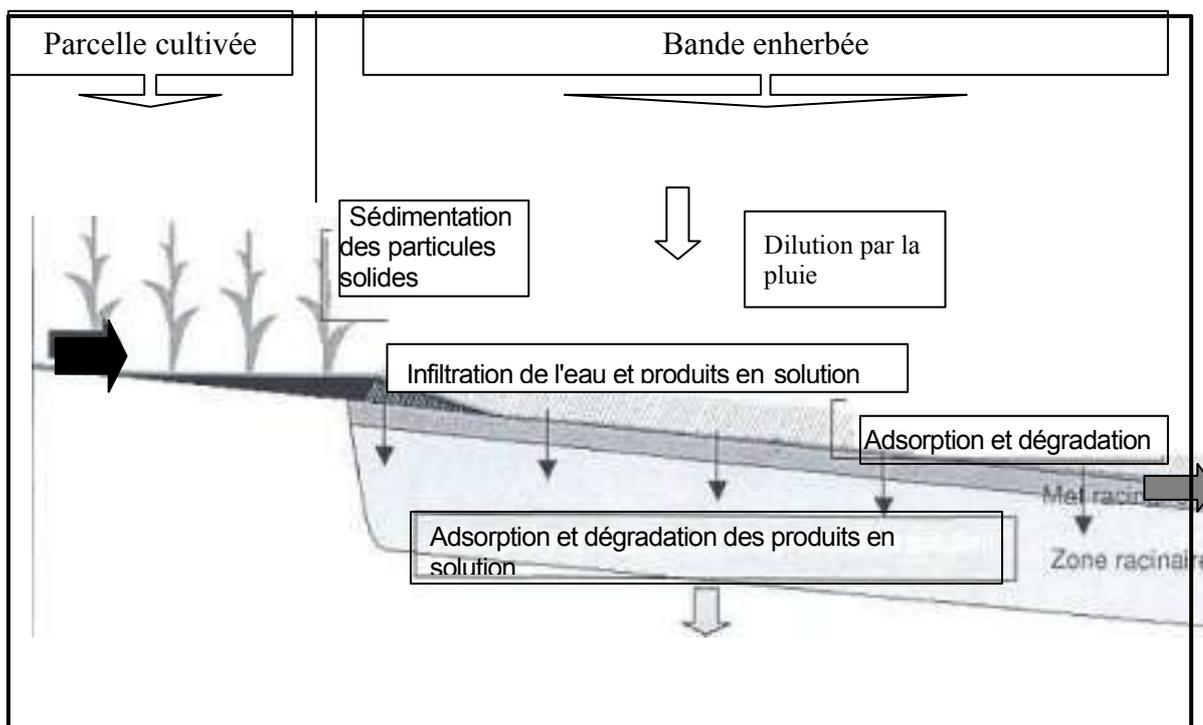
III.2. Principales propriétés d'une bande enherbée déterminant le potentiel d'interception

Le schéma de la figure 5 illustre le processus de transfert des pesticides dans une bande enherbée. A travers ce schéma, trois processus sont mis en jeu : l'infiltration, la sédimentation et l'adsorption. L'efficacité d'une bande enherbée se mesure à travers l'optimisation de ces trois processus.

III.2.1. La capacité d'infiltration

La capacité d'infiltration dépend en premier lieu de la surface infiltrante, qui est reliée aux dimensions du dispositif (longueur ; largeur). L'impact de la longueur enherbée sur les volumes infiltrés a été mis en évidence par des études par comparaison des flux sortant de bandes de longueurs différentes (Dillaha et al., 1989).

Figure 5 : Schéma des processus et transferts possibles dans un « système bande enherbée »



Source : Adapté de Lacas, 2005, p. 26

La capacité d'infiltration d'une bande au cours d'un événement de crue est également contrôlée par les propriétés hydrodynamiques du sol. Ces dernières dépendent notamment de la structure de la couche de surface du sol donc de tous les facteurs l'influençant : le type de sol, son histoire culturale, l'ancienneté et la nature du couvert herbacé, qui présente un effet structurant sur la porosité du sol (Benoit et al.).

Les observations sur bande enherbée confirment que l'efficacité d'une bande enherbée est réduite lorsque le sol est déjà proche de la saturation quand le ruissellement intervient (Arora et al., 1996). De même la capacité d'infiltration tend plus ou moins

rapidement vers zéro lorsque le profil de sol présente une limite imperméable à faible profondeur.

III.2.2. La capacité de sédimentation

Les expériences sur maquettes indiquent que les paramètres ayant une influence effective sur la rétention des particules solides en amont d'une bande enherbée sont les caractéristiques granulométriques des particules en suspension, la vitesse de l'écoulement entrant dans la bande et la hauteur d'eau accumulée contre le bord en amont de la bande par effet de barrage (Dabney et al.). Les propriétés mécaniques du couvert et notamment sa densité et sa résistance à la flexion (liée au diamètre des tiges) sont ainsi déterminantes. La densité de la végétation apparaît bien déterminante pour la rétention des particules, lorsqu'on compare des bandes âgées de 2 ans à des bandes de 15 ans ou 25 ans, plus denses (Schmitt et al.).

III.2.3. La capacités d'adsorption

La capacité d'adsorption dépend en premier lieu de la surface de contact entre l'eau et le substrat. Elle est, par ailleurs, potentiellement liée à l'ensemble des facteurs intervenant dans l'adsorption des composés organiques : la nature de l'adsorbat, celle du substrat absorbant, la teneur en eau de l'adsorbant, la quantité d'adsorbat disponible, la présence d'autres molécules organiques ou ions minéraux, le pH et la température (Calvet et al., 1980). En ce qui concerne les herbicides, de nombreuses études en laboratoire ont montré que la mobilité de ces produits était essentiellement contrôlée par la teneur en matière organique du milieu (Stoeckel et al, 1997). Enfin, l'adsorption peut également être corrélée avec la teneur en argile, qui est le deuxième constituant du sol adsorbant après la matière organique.

III.4. Efficacité des bandes enherbées

De nombreuses études ont démontré l'efficacité des zones tampon dans la rétention des pesticides. Lacas (2005), dans le cadre de sa thèse a fait une synthèse sur les travaux de

différents auteurs sur les bandes enherbées. Les résultats présentés dans le tableau 1 montrent que les zones tampons peuvent être très efficaces pour dissiper les flux de phytosanitaires présents dans le ruissellement de surface. L'efficacité est meilleure avec des largeurs de bandes atteignant les 20 mètres (100% de rabattement). Cependant on constate une grande variabilité dans les résultats. On peut tenter d'expliquer ces résultats par trois raisons : les conditions d'expérimentation, la variabilité simultanée des paramètres et la formulation des résultats.

Tableau I : Synthèse des résultats concernant la dissipation des pesticides dans les bandes enherbées

Auteurs	Conditions expérimentales	Largeurs (m)	Dissipation des flux (%)		
			Nature du flux	Masse	Conc.
Arora et al.	Pluie naturelle	20	Eau	9-18	
			Atrazine tot.	13-100	
			Metolachlore tot.	22-100	
			Cyanazine tot.	15-100	
Webster et Shaw	Pluie naturelle	2	Eau	0-65	
			Metolachlore dis.	13-88	
			Métribuzin.	22-89	
Lowrance et al.	Pluie naturelle	8	Atrazine tot.	37-86	0-68
			Alachlore tot.	50-94	0-75
Souiller et al. (2002)	Ruissellement simulé	3	Eau	55-92	
			Diflufénicanil dis.	61-98	25-70
			Atrazine dis.	60-95	<10
			Isoproturon dis.	61-79	<10
			Diuron dis.	62-31	<10

Source : Adapté de Lacas, 2005, page 23

III.4.1. Les conditions d'expérimentation

Les expérimentations réalisées en conditions naturelles reproduisent la configuration d'une zone tampon adjacente à une parcelle cultivée, soumise à une pluie quelconque. Par contre en condition contrôlée la zone tampon n'est pas généralement arrosée lors de l'expérimentation. La bande d'expérimentation est généralement sèche. Ce qui ne rend pas compte de la dilution des flux et de l'augmentation de la capacité de transport induite. De plus lors des simulations l'écoulement a une vitesse nulle en entrée de la bande et la concentration en pesticides est généralement constante pendant toute la

durée de l'expérimentation. En conditions naturelles on observe le contraire de ces événements.

III.4.2. Variabilité simultanée des paramètres

Plusieurs paramètres expérimentaux varient souvent simultanément d'un résultat à l'autre, de telle sorte qu'il est difficile d'attribuer des écarts constatés à un paramètre particulier. C'est le cas des dimensions des bandes enherbées, les dimensions de la zone de ruissellement, l'intensité et la durée de l'événement, le type de molécule. De plus, certains paramètres clés comme l'état hydrique du sol et les propriétés hydrodynamiques du sol ne sont quasiment jamais renseignés ou n'ont pas été mesurés.

III.4.3. Formulation des résultats

Les résultats peuvent être formulés en terme de quantité de matière, de concentration, de flux moyen ou de flux instantané. Faute d'une harmonisation de présentation des résultats, leur comparaison entre eux est un exercice difficile et est sujette à de nombreuses interprétations. De plus, le fait de comparer des résultats obtenus par différents protocoles expérimentaux et différents auteurs apparaît relativement aléatoire. Comme le montre le tableau 1, la dispersion des résultats est surprenante et n'autorise aucune corrélation entre l'efficacité d'une zone tampon et sa largeur.

Cette variabilité dans les valeurs d'efficacité illustre clairement la diversité des processus physiques et bio-chimiques intervenant dans le fonctionnement d'une bande enherbée et le fait que leur contribution relative peut varier d'une situation à l'autre en fonction de nombreux paramètres. Cette variabilité incite à un dimensionnement des bandes enherbées en fonction du contexte. Dans la partie qui suit, nous identifierons les critères retenus par certains pays et organismes pour dimensionner les bandes enherbées.

III.5. Survol des méthodes pratiques d'établissement de bandes enherbées

Depuis plusieurs années, la bibliographie sur les capacités d'épuration des bandes enherbées vis-à-vis des produits phytosanitaires s'est considérablement étoffée. Les études menées ont visé la mise en évidence de l'efficacité des bandes enherbées à

retenir les produits. Elles ont examiné aussi une meilleure compréhension des processus et facteurs affectant leur fonctionnement, l'objectif in fine étant de rechercher des règles de dimensionnement et de localisation de ces zones afin d'augmenter leur efficacité dans l'épuration. A travers les programmes et les textes réglementaires certains pays et organismes ont défini des méthodes d'établissement des bandes enherbées (tableau 2).

Figure 6 : Quelques propositions de dimensionnement des dispositifs enherbés

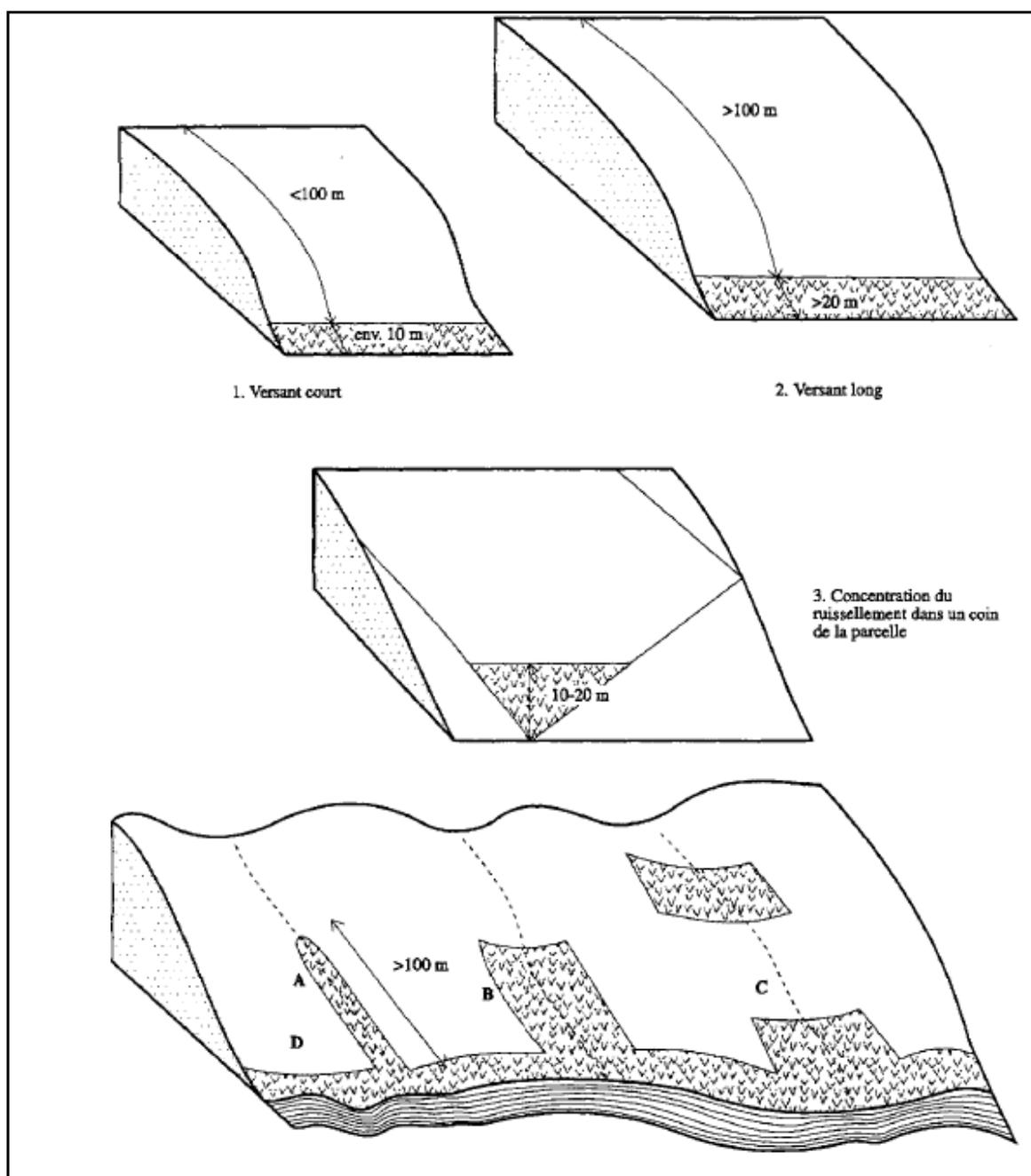


Tableau II : Méthode d'établissement des zones tampon par certains pays et organismes.

PAYS OU ORGANISMES	CRITERES D'ETABLISSEMENT	CADRE D'APPLICATION	SOURCES
Nouveau-Brunswick	Largeur varie de 15 à 60 m selon la pente et la largeur du cours d'eau	- <i>Watercourse Buffer Zone Guidelines for Crown Land Forestry Activities</i> - La Loi sur l'assainissement de l'eau	Ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux http://www.gnb.ca/0009/
Québec	La largeur de la bande enherbée varie entre 10 et 15 mètres selon la pente	Décret 468-2005 du gouvernement du Québec portant sur la Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables	Gouvernement du Québec, 2005
Royaume-Uni	Bande enherbée fixe de cinq mètres en bordure des cours d'eau pour tous les produits pulvérisés	Projet appelé <i>Local Environmental Risk Assessment for Pesticides</i> (LERAP)	Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire, 2005
France	Bande enherbée de 5 à 10 mètres de largeur le long des cours d'eau et représentant 3% de la superficie de l'exploitation	Politique agricole commune (PAC)	Aubertot et al., 2005
Comité d'Orientation pour la Réduction de la Pollution des Eaux par les Nitrates, les Phosphores et les Produits phytosanitaires provenant des activités Agricoles (CORPEN)	Bande enherbée de 10 à 20 mètres de largeur le long des cours d'eau en fonction de la longueur du versant (Figure).	Programme d'action contre la pollution des eaux par les produits phytosanitaires provenant des activités agricoles	CORPEN, 1997

Source : Auteur

En France, le Comité CORPEN a établi des largeurs de zones tampon en fonction de la longueur du versant (Figure 5). On attribue une zone tampon de 10 m de largeur aux versants dont la longueur est inférieure à 100 m. Pour ceux dont la longueur est supérieure à 100 m, la largeur de la zone tampon correspondante est supérieure à 20 m. L'établissement des zones tampons est aussi prévu dans les zones à forte concentration de ruissellement.

En général, les méthodes d'établissement des bandes enherbées varient peu d'un pays à l'autre. Par contre les largeurs des bandes enherbées sont variables (5 à 60 m) selon le pays. Un facteur essentiel intervient dans la détermination de la largeur de la bande enherbée : le facteur pente de la zone riveraine. Les méthodes de détermination des largeurs des bandes enherbées sont donc simplifiées car dépendant d'un seul facteur.

III.6. Conclusion partielle

Les pesticides, malgré leur effet bénéfique sur la productivité agricole, constituent une menace pour les espèces ichtyologiques et leur habitat. Le processus qui régit leur transfert dans le milieu aquatique est aussi complexe que le mécanisme de leur abatement par les bandes enherbées. Pourtant dans la pratique, les méthodes d'établissement de ces bandes enherbées reposent sur un seul facteur qui est la pente de la zone riveraine. Ces méthodes ne suivent donc pas les recommandations des études scientifiques réalisées sur les bandes enherbées.

La pente n'est pas le seul facteur explicatif de l'efficacité d'une bande enherbée. Pour accroître l'efficacité de ces dispositifs et leur conférer une base scientifique il faut intégrer tous les facteurs importants intervenant dans les deux processus (transfert et abatement des pesticides). Manipuler des opérations algébriques sur l'ensemble de ces facteurs pour en tirer une information utile reste un exercice fastidieux dont les résultats sont incertains. Pour pallier cette difficulté, nous proposons une démarche permettant l'intégration d'une multitude de facteurs. Un outil associé à cette démarche permet de suggérer l'emplacement et les dimensions de la bande enherbée. En outre cet outil permettra aux gestionnaires des bassins versants de disposer des informations sur l'ampleur de la pollution par parcelle cultivée et par sous bassin versant.

DEUXIEME PARTIE : CADRE CONCEPTUEL**MODELE CONCEPTUEL DES BANDES ENHERBEES ET
ORGANISATION DE L'INFORMATION**

CHAPITRE IV : GEOMATIQUE : OUTILS ET DOMAINES D'APPLICATIONS

Le processus d'interception des pesticides par les bandes enherbées expliqué dans la première partie du document nous renseigne sur sa complexité et le nombre de paramètres pertinents qui interviennent. Dans cette partie nous présentons un outil qui permet de gérer la multitude de données et d'en sortir des informations pertinentes utiles à la prise de décision de gestion.

IV.1. Définitions de la géomatique

Le concept de géomatique a été défini par plusieurs scientifiques. Toutes ces définitions visent les mêmes objectifs. Le terme géomatique a été introduit pour la première fois au Canada pour désigner l'ensemble des disciplines qui font appel à des données à référence spatiale (cartographie, topographie, géographie, la télédétection, photogrammétrie, système d'information géographique,..).

En 1993, l'office de la langue française du Québec adopte le terme géomatique et le définit comme « la discipline ayant pour objet la gestion des données à référence spatiale et qui fait appel aux sciences et aux technologies reliées à leurs acquisitions, leur stockage, leur traitement, et leur diffusion ». Selon le Groupe de Recherche Canadien en Géomatique de la Santé cité par Béné (2006), la géomatique se définit comme étant «le domaine scientifique qui s'intéresse à l'acquisition, la gestion, l'analyse et à la distribution des données à référence spatiale concernant le monde dans lequel nous vivons ».

IV.2. But de la géomatique

D'une manière générale, selon Béné, la géomatique vise à:

- définir les bases de référence spatiale ;
- développer et utiliser les méthodes, techniques et outils pour localiser et mesurer des objets sur le territoire ou à mettre en place ;

-
- intégrer ou rendre intégrables les données obtenues en fonction du système de référence choisi, c'est à dire faire de la modélisation mathématique pour transformer un besoin du monde réel ;
 - fournir des données et des informations de qualité ;
 - analyser différents scénarios décisionnels à partir d'informations obtenues en tirant profit des méthodes mathématiques d'optimisation (analyses multivariées, recherches opérationnelles).

IV.3. Outils de la géomatique

Pour être efficace, la géomatique s'appuie sur plusieurs outils d'analyse spatiale parmi lesquels on peut citer les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la télédétection. D'autres outils comme la cartographie assistée par ordinateur (CAO), le Système de Positionnement Global ou *Global Positioning System* (GPS) sont également utilisés. Tous ces outils spécialisés dans les études spatiales permettent de produire des résultats satisfaisants. Cependant, les SIG constituent l'élément central autour duquel les autres outils lui sont souvent associés.

IV.3.1. Système d'information géographique (SIG)

Le SIG est un outil spécialisé dans la gestion et l'analyse des données à référence spatiale. Il est défini comme un système d'information spatiale dans lequel la Terre est l'objet de référence fondamental. Il donne la possibilité de traiter un ensemble de données référencées dans l'espace. Les données sont structurées de façon à favoriser la synthèse. C'est un puissant outil de stockage, d'accès, de manipulation et de présentation des données à référence spatiale pour orienter les prises de décision. Il donne la possibilité de réaliser des scénarios d'intervention sur l'environnement et de faire des simulations sur les conséquences de tel ou tel changement ou aménagement du milieu.

Selon Theriault (1996), le SIG est caractérisé par trois composantes principales que sont :

-
- les équipements constitués par le matériel informatique ;
 - le logiciel permettant la saisie, l'organisation et la manipulation des données recueillies ;
 - le cadre organisationnel qui facilitera la mise en place du SIG.

Le premier intérêt d'un SIG est de pouvoir croiser des informations spatialisées de manière très précise grâce à des requêtes simples ou complexes. Le deuxième intérêt permet de visualiser rapidement sous forme de cartes thématiques les informations et les analyses en résultant.

IV.4. Quelques applications des SIG

IV.4.1. Gestion de l'environnement et de l'agriculture

Les applications SIG destinées à la gestion de l'environnement sont multiples et illimitées. Chaque spécialité peut intégrer avec succès la dimension géographique : inventaire des espèces animales, du couvert végétal, de la nature du sol, gestion des pollutions ou analyse d'impact. L'analyse spatiale de données scientifiques géoréférencés est l'une des principales préoccupations des chercheurs et gestionnaires de l'environnement. L'agriculture utilise de plus en plus cet outil de travail afin de modéliser précisément l'occupation des sols et leur exploitation.

IV.4.2. Analyse des écosystèmes

Le SIG permet d'inventorier les constituants d'un écosystème (faune, flore, minéral) et de comparer leur répartition avec des paramètres géo référencés (nature du sol, présence d'autres espèces,...). Les recensements de populations animales ou végétales ont toujours nécessité une représentation cartographique, l'utilisation d'un SIG apporte une souplesse d'utilisation et une évolutivité que ne permettent en aucun cas les représentations papier.

IV.4.3. Analyse de pollution

L'analyse de la répartition géographique de zones de pollutions permet de situer et de traiter efficacement le problème. Des mesures de pollutions peuvent être effectuées sur le terrain par des opérateurs puis les résultats sont intégrés au SIG pour exploitation, il est aussi possible d'automatiser ces processus par récupération de données en provenance de stations d'analyse automatisées (analyse de la qualité de l'air, station météorologique,...).

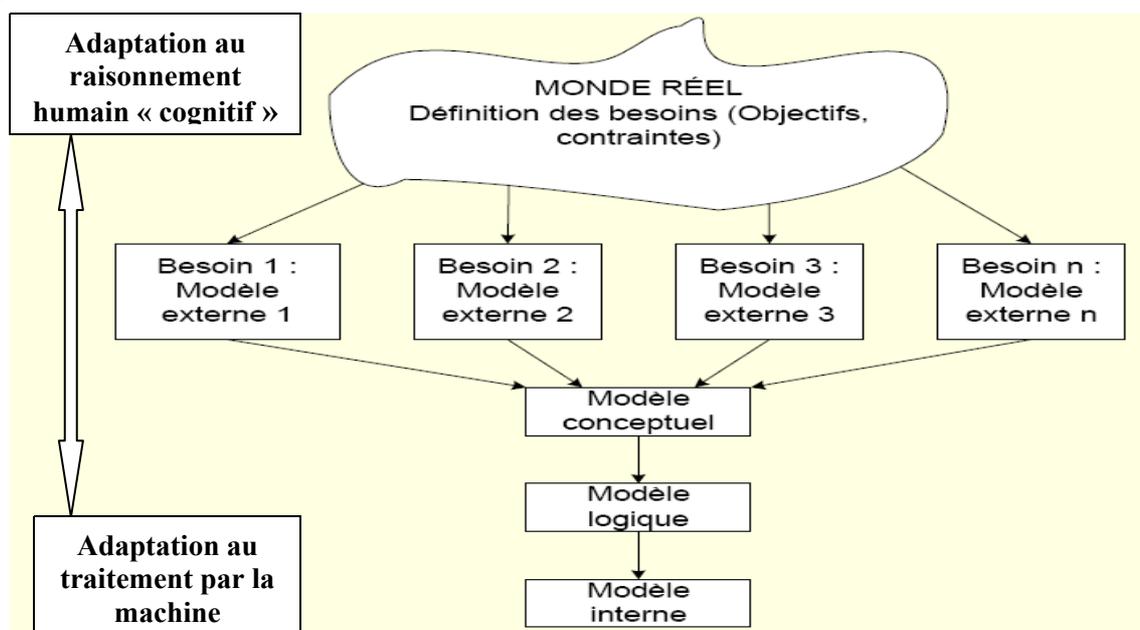
CHAPITRE V : SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET MODELISATION

Comme nous l'avons vu au chapitre 1 l'une des fonctionnalités des SIG est la modélisation. Pour Bénéié, la modélisation peut se définir comme la structuration des données c'est-à-dire leur organisation de façon à les rendre intégrables. La modélisation est aussi une organisation de la pensée en vue d'une finalité pratique. Un modèle sera donc une représentation mentale d'un être du monde réel et de son fonctionnement (Volle, 2004).

Selon Jean-Luc Hainaut (2002), « Modéliser consiste à construire une représentation abstraite formelle, généralement de nature mathématique, des aspects de ces situations sur lesquelles porte notre intérêt ». Ainsi, modéliser un être revient à définir les concepts qui permettent de le décrire et les relations fonctionnelles que ces concepts entretiennent entre eux.

La modélisation est composée de trois étapes : la modélisation conceptuelle, la modélisation logique ou mathématique et la modélisation physique (fig. 7). Les différents niveaux de la modélisation se schématisent comme présenté ci-dessous :

Figure 7 : Différents niveaux de la modélisation



V.1. Différents niveaux de la modélisation

V.1.1. Niveau 1 : Monde réel

Tout projet de modélisation nécessite une analyse du problème posé. A l'issue de cette analyse, on identifie les besoins exprimés et on définit le but et les objectifs à atteindre. Dans notre contexte il s'agit d'une part de localiser les zones à risque de pollution et d'autre part de définir la largeur efficace de la bande enherbée comme une zone tampon.

V.1.2. Niveau 2 : Niveau externe

Chaque besoin identifié permettra de définir un modèle externe indépendant. On obtient 3 modèles externes : un modèle externe qui représente la pression polluante, un modèle externe qui représente la vulnérabilité des parcelles cultivées et un modèle externe qui représente la vulnérabilité du réseau hydrographique

V.1.3. Niveau 3 : Niveau conceptuel

C'est l'étape de la réalisation de la synthèse des modèles externes définis plus haut. C'est, en d'autres termes, le lieu de l'établissement des concepts qui serviront de base à la conception de la base de données. C'est un outil de schématisation et de représentation du monde réel qui demande la participation des utilisateurs à travers des discussions et des dialogues.

V.1.4. Niveau 4 : Niveau logique

Le niveau logique constitue le premier niveau informatique de la modélisation. Il a pour objectif d'adapter le modèle conceptuel aux exigences des systèmes de gestion des bases de données qui peuvent être construits selon la structure hiérarchique, la structure en réseau ou la structure relationnelle.

V.1.5. Niveau 5 : Niveau interne ou physique

Le niveau interne ou physique correspond au système de fonctionnement de l'ordinateur. Il s'agit de la structure physique des données qui doit se faire en tenant compte de la structure même des périphéries de stockage et des méthodes d'accès. Cette étape est généralement du domaine de compétence des techniciens spécialistes de la programmation informatique.

CHAPITRE VI : MODELISATION DE LA BANDE ENHERBEE

La réalisation du modèle conceptuel, insiste sur la définition des paramètres qui permet de caractériser chaque facteur. Dans notre modèle nous considérons le type entité association. Dans ce type, les objets du monde réel sont appelés entités. Chaque entité sera caractérisée par un ou plusieurs attributs qui permettent de la distinguer.

Le modèle qui sera élaboré servira de base à la mise en place d'un modèle mathématique qui sera intégré dans un système d'information géographique. En s'appuyant sur la théorie de la modélisation nous avons identifié trois composantes :

- la pression polluante ;
- la vulnérabilité des parcelles ;
- la vulnérabilité du réseau hydrographique.

VI.1. Définition des termes

VI. 1.1. La pression polluante

Nous appelons pression polluante toutes actions humaines quantifiables qui contribuent à produire et à amplifier des phénomènes de pollution. Ici les différentes pratiques culturales et les pesticides et leur mode d'utilisation constituent des facteurs clés de la pression polluante.

VI. 1.2. La vulnérabilité

Ce terme est fondé sur une description physique des principaux phénomènes mis en jeu. Selon les contextes la définition peut différer. L'UNESCO citée par Coste (2001) propose l'approche suivante de la vulnérabilité : « une tendance des choses à être endommagées par les aléas ». Dans notre cas d'étude nous privilégions l'approche vulnérabilité intrinsèque, qui est déterminée uniquement en fonction du milieu indépendamment d'une source de pollution

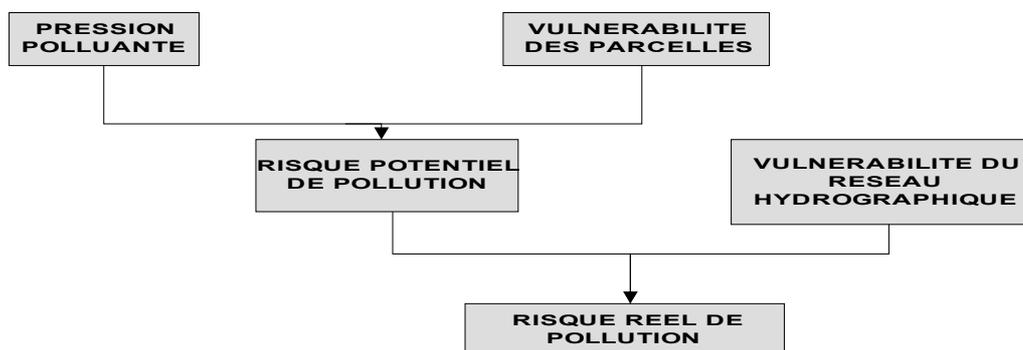
VI. 1.3. Le risque

Le risque constitue, également le croisement de la pression et de la vulnérabilité selon Coste. Formalisée en un langage mathématique, cette définition s'écrit :

Risque = Pression \times Vulnérabilité (1).

Ainsi le risque dépend à la fois de la vulnérabilité et de la pression de pollution. Nous avons deux niveaux de risques : le risque de pollution potentiel et le risque de pollution réel (figure 8). Le risque de pollution potentiel se définit en excluant la présence et les propriétés du réseau hydrographique. A l'inverse le risque de pollution réel est la résultante du croisement entre le risque potentiel et la vulnérabilité du réseau hydrographique.

Figure 8 : Relations entre les grandes composantes du modèle.



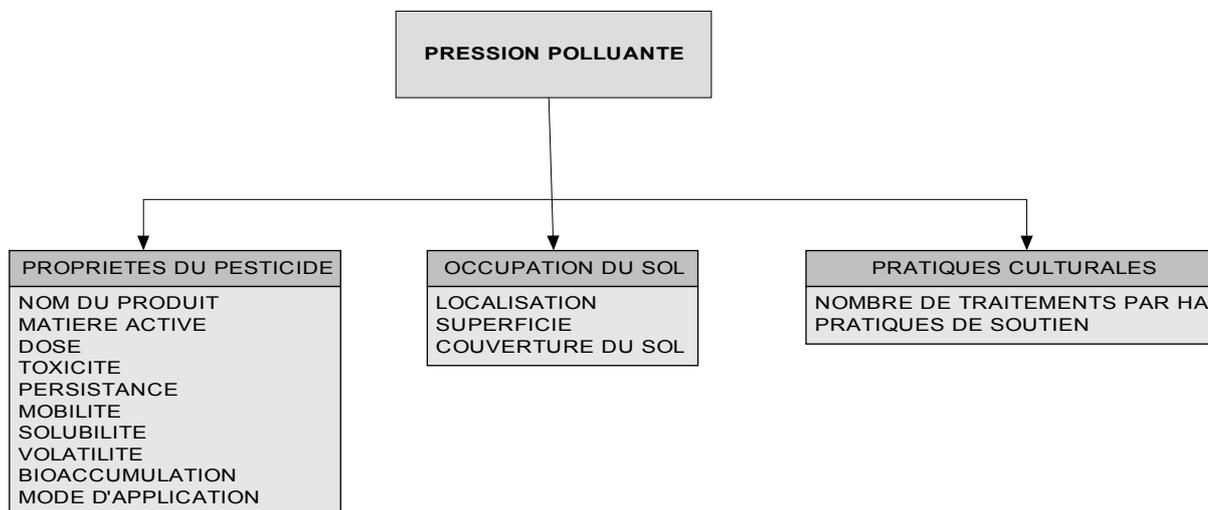
VI.2. Modélisation de la pression polluante

Plusieurs facteurs concourent à créer et à augmenter la pression polluante (fig. 9) :

- les propriétés du pesticide ;
- l'occupation du sol ;
- les pratiques culturales.

Les définitions et les caractérisations de tous les facteurs intervenant dans la pollution ont été faites dans la première partie de ce document. Dans la présente partie, nous nous contenterons de brèves explications des facteurs.

Figure 9 : Modèle conceptuel de la pression polluante.



VI.2.1. Les propriétés du pesticide

Le nom du produit : Ce nom peut être un nom commun proposés par l'industriel, par les organismes de normalisation. Certains noms sont des noms génériques, exemple : cyperméthrine.

La matière active : Elle est définie par la molécule chimique qui détruit ou empêche l'organisme nuisible. Ces substances actives figurent obligatoirement sur l'étiquette.

La dose : Elle exprime la quantité de matière active appliquée par unité de surface qui est généralement le hectare.

La toxicité : Elle s'exprime en 50% de concentration létale CL_{50} pour le poisson sur un temps donné. Plus la CL_{50} est petite, plus le produit est toxique. Pour évaluer la toxicité aiguë, on calcule la CL_{50} pendant une durée d'exposition donnée courte (24h, 48h, 72h ou 96 heures).

La persistance : Elle est définie comme la demi-vie (DT_{50}) c'est à dire le temps requis pour la concentration ambiante pour diminuer de 50%. Elle est calculée à partir des concentrations mesurées au cours du temps dans un sol donné. Elle peut aller de quelques semaines à une trentaine d'années.

La mobilité : Le coefficient d'adsorption, obtenu au laboratoire, caractérise la mobilité de la substance active. K_d est le coefficient de distribution sol-eau mesuré expérimentalement pour un sol donné (en mettant en présence une solution de la substance et une masse donnée du sol), et calculé selon une isotherme linéaire. Il est exprimé habituellement en cm^3 / g .

La solubilité : La solubilité dans l'eau généralement est un des paramètres de la lessivabilité des pesticides. Elle est exprimée en mg/l à une température donnée.

La volatilité : La constante de Henry caractérise l'aptitude d'une substance active en solution à se volatiliser. Elle s'exprime en Pascal / m^3 / mole. La température accompagne cette donnée.

La bioaccumulation : Elle est caractérisée par le $\log(K_{ow})$; K_{ow} étant le coefficient de partage octanol/eau. C'est est une grandeur sans unité. Il exprime la susceptibilité du pesticide à la bioaccumulation.

Le mode d'application : Le mode d'application d'un pesticide est déterminant sur son devenir dans l'environnement. On distingue :

- les applications des pesticides par enfouissement dans le sol. Dans ce cas ces produits sont moins susceptibles d'être ruisselés ;
- les applications par épandage simple sans enfouissement. Ce mode d'application est un facteur aggravant la mobilité des substances dans le milieu ;
- les applications par pulvérisation qui facilitent la mobilité des molécules vers les zones de drainage.

VI.2.2. Occupation du sol

Localisation : Les coordonnées géographiques de chaque point sont définies. Les cartes d'occupation du sol renforcées par des enquêtes sur le terrain permettent d'avoir la position géographique de chaque point de la parcelle de cultures et du bassin versant.

La superficie : C'est la superficie de chaque parcelle obtenue par des mesures sur le terrain. Quant aux superficies des bassins versants elles sont déterminées grâce aux fonctionnalités des SIG.

La couverture du sol : L'érosion est faible dans une parcelle où le sol est couvert par les plantes. De plus, le couvert végétal intercepte une part relativement importante des pesticides appliqués. Le type de plante et le stade végétatif permettent en théorie de déterminer le taux de couverture du sol par les plantes.

VI.2.3. Les pratiques culturales

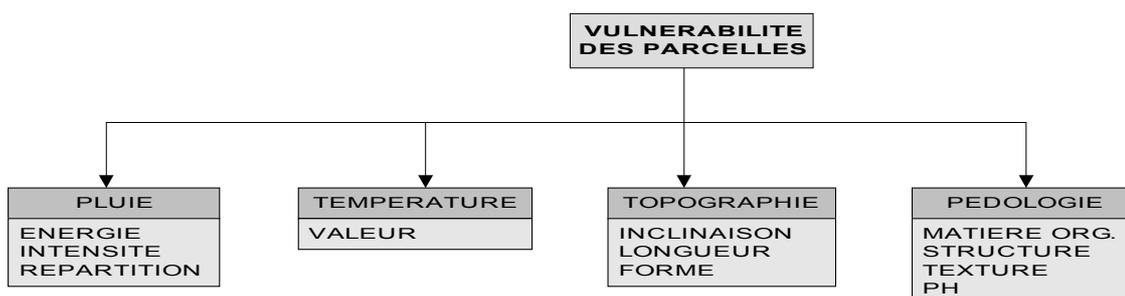
Nombre de traitements par hectare : Chaque culture exige un minimum de protection. Par des enquêtes auprès des exploitants agricoles nous pouvons avoir le nombre de traitements effectués par campagne agricole. Le résultat visé étant la quantité totale de pesticides appliqués par hectare et par campagne agricole.

Les pratiques de soutien : Les pratiques de soutien se caractérisent par un facteur qui est une mesure des effets des pratiques visant à modifier le profil, la pente ou la direction de l'écoulement du ruissellement en surface et à réduire ainsi l'érosion. Les pratiques de soutien courantes sont : la culture en pente transversale, la culture en courbes de niveau, la culture en bandes alternantes, l'aménagement de terrasses.

VI.3. Modélisation de la vulnérabilité des parcelles de cultures

Plusieurs facteurs contribuent à rendre vulnérables les parcelles face au risque de pollution. Ces facteurs sont la pluie, la température, la topographie, la pédologie et la géologie (fig. 10).

Figure 10 : Modèle conceptuel de la vulnérabilité des parcelles.



VI.3.1. La pluie

Nous retiendrons ici les attributs du climat qui influent sur le ruissellement. Ce sont l'énergie des orages, leur intensité et leur répartition.

L'énergie des orages : Elle exprime le volume d'eau de pluie et de ruissellement produit durant un orage. Une longue pluie lente ou une pluie de courte intensité, à volume élevé peuvent avoir la même incidence. Les faibles volumes sur de courtes périodes avec de longs intervalles entre les orages ont un faible potentiel de ruissellement et donc de transport de substances.

Intensité des orages : Elle exprime la quantité d'eau de pluie par unité de temps (p. ex. cm/heure). Plus les orages sont intenses plus ils sont susceptibles de provoquer le détachement et le transport de pesticides

Répartition annuelle des pluies érosives : Elle traduit la quantité d'eau de pluie et de ruissellement produite durant les différents mois/saisons de l'année. En Côte d'Ivoire, les orages les plus érosifs se produisent en des périodes différentes selon qu'on se trouve au Nord ou au Sud du pays.

VI.3.2. La température

La température exprimée en degré Celsius modifie plusieurs propriétés des pesticides dont la volatilité, la mobilité et la dégradation.

VI.3.3. La topographie

Trois paramètres décrivent la topographie d'un site donné : l'inclinaison, la longueur et la forme.

L'inclinaison : C'est une mesure de la pente qui est exprimée en angle ou en pourcentage. Le ruissellement et sa vitesse augmentent avec l'accroissement du gradient de la pente.

La longueur de la pente : Elle est mesurée à partir du point où commence l'écoulement de surface jusqu'à l'endroit où le gradient de la pente décroît et les sédiments érodés se déposent avec les molécules de pesticides. Le ruissellement (et donc le transport de pesticide) s'intensifie avec l'augmentation de la longueur de la pente.

La forme de la pente : La forme de la pente peut être uniforme, concave ou convexe. Les versants concaves ont généralement un taux d'érosion plus faible qu'une pente uniforme dont l'inclinaison moyenne est similaire. Par contre les versants convexes ont un taux d'érosion généralement plus élevé que sur la pente uniforme.

VI.3.4. La pédologie

Le sol est le support de mobilité des pesticides. Les propriétés du sol déterminent le comportement des pesticides après leur application. Ces propriétés sont le taux de matière organique, le PH, la structure et la texture.

Les matières organiques : La matière organique contribue à lier les particules de sol. Elle a une incidence sur les capacités d'infiltration et de ruissellement. Les sols à teneur élevée en matières organiques présentent une plus grande résistance au ruissellement et à la mobilité des molécules de pesticides.

La structure du sol : Elle informe sur la répartition des particules de sable et des agrégats. C'est une indication du degré de liaison des particules du sol lui permettant de résister à l'érosion. Les sols qui ne se désagrègent pas facilement, mais qui permettent l'infiltration résistent mieux à l'érosion et donc au transfert des pesticides. Les différentes classes d'une structure de sol sont les suivantes :

- granulaire très fine (sans structure) ;
- granulaire fine ;
- granulaire moyenne ou grossière ;
- polyédrique, lamellaire ou massive.

A chaque classe peut correspondre une valeur déterminée par les experts.

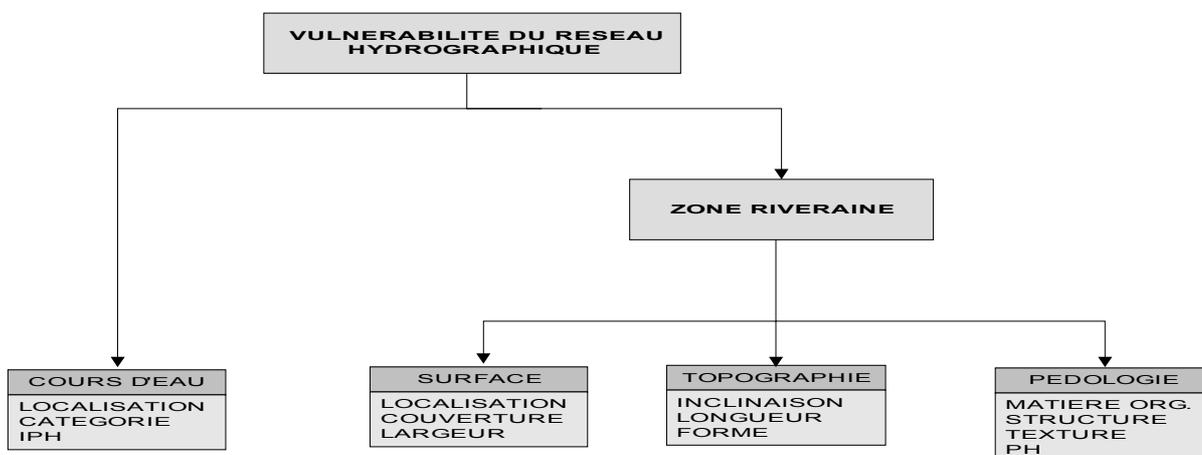
La texture du sol : La proportion en sable, limon et argile d'un sol donné détermine sa texture. Elle caractérise la sensibilité du sol à l'érosion hydrique. Les sols sableux et limoneux contribuent à la mobilité des pesticides dans le milieu.

Le pH : Le pH du sol influe sur plusieurs propriétés des pesticides: la mobilité, la persistance et la volatilité. Il conditionne donc le devenir des molécules dans le sol.

VI.4. Modélisation de la vulnérabilité du réseau hydrographique

Le modèle du réseau hydrographique (figure 11) se compose de deux sous modèles : le modèle du cours d'eau et celui de la zone riveraine. La zone riveraine constitue l'espace d'établissement de la bande enherbée. Il est donc important de définir toutes les propriétés qui influent sur son efficacité.

Figure 11 : Modèle conceptuel de la vulnérabilité du réseau hydrographique.



VI.4.1. Le cours d'eau

Les attributs du cours d'eau sont sa localisation, sa catégorie et son IPH

La localisation : La localisation est définie par les coordonnées géographiques du cours d'eau.

La catégorie : Les cours d'eau peuvent être des fleuves ou des rivières. Certains sont permanents et d'autres sont saisonniers. Chaque poids doit être attribué à chaque catégorie de cours d'eau. Les cours d'eau permanents bénéficient d'une protection plus renforcée.

IPH : L'indice probabiliste de qualité d'habitat (IPH) représente la probabilité d'observer des poissons sous des conditions physiques spécifiques (le courant d'eau, la profondeur, la température, la richesse en zoo et phytoplancton etc.)

VI.4.2. La zone riveraine

Les facteurs intervenants dans la zone riveraine sont la surface, la topologie et la pédologie. Les attributs de la topologie et de la géologie sont ceux décrits au niveau de la vulnérabilité des parcelles au.

VI.4.3. La surface

La surface de la zone riveraine a pour attributs la localisation, la couverture et la largeur.

La localisation : Grâce à la télédétection et au SIG les références géographiques de la zone riveraine sont définies.

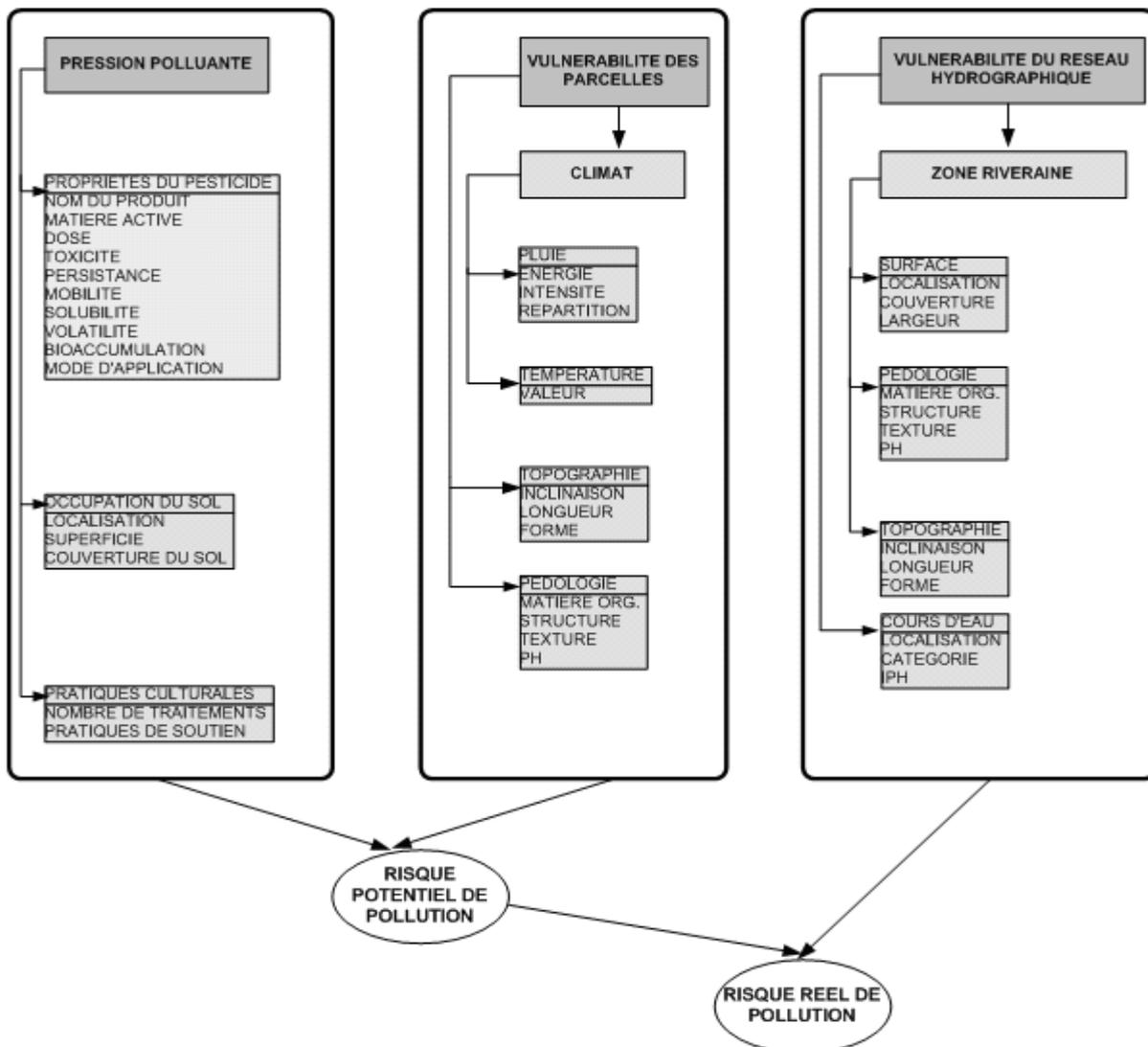
La couverture : La végétation riveraine joue un rôle important dans la lutte contre les pollutions. Le type de végétation et la densité sont parmi les facteurs qui déterminent l'efficacité de ces zones. On peut y rencontrer des zones nues, des zones herbacées et des zones arborées. Chaque type de couverture est affecté d'un poids.

La largeur : La largeur de la zone riveraine détermine la proximité de la parcelle au réseau hydrographique. Dans notre modèle ce facteur représente le paramètre clé de sortie. Il permet de dimensionner les bandes enherbées en fonction du risque réel encouru par le réseau hydrographique.

VI.5. Modélisation conceptuelle du système (pression polluante-vulnérabilité des parcelles-vulnérabilité du réseau hydrographique)

Le modèle de la figure 12 tel que conçu nous révèle les grandes composantes du risque de pollution à savoir la pression polluante, la vulnérabilité des parcelles et la vulnérabilité du réseau hydrographique. La bande enherbée se trouve dans la sous composante « Zone riveraine » qui contient trois entités dont la « Surface ». Les attributs de l'entité « Surface » (localisation, couverture et largeur) constituent les paramètres sortant de notre modèle. Inversement en introduisant ces paramètres dans le modèle, l'on peut obtenir le niveau de pression polluante que la parcelle peut supporter sans risque de pollution des eaux.

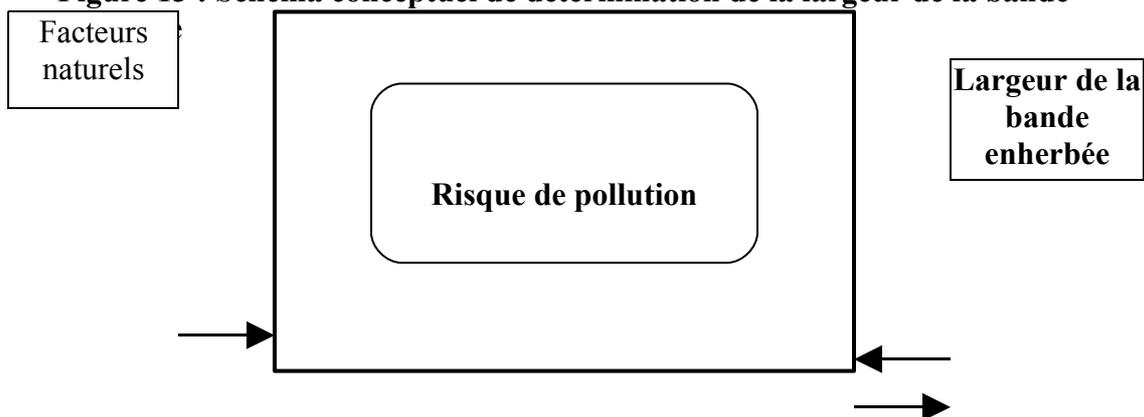
De façon globale, le système est appelé à indiquer le niveau de risque d'une parcelle ou d'un bassin versant en fonction des nombreux facteurs qui concourent à la pollution des eaux de surface. Il a l'avantage de fournir certaines informations certes intermédiaires mais importantes dans la gestion d'un bassin versant. Ces informations qui seront agrégées par parcelle cultivée et par sous bassin versant sont :



VI.6. Détermination de la largeur et localisation de la bande enherbée

L'un des intérêts de la modélisation est de parvenir à faire des scénarios pour déterminer ou mesurer les effets d'un paramètre sur l'autre. Dans notre cas d'étude deux groupes de paramètres sont identifiés (figure 13) : les paramètres difficilement modifiables (les facteurs naturels) et ceux facilement modifiables par l'homme tels que la pression polluante, les limites maximales de risque et la largeur de la bande enherbée. La limite maximale de risque reflète la norme de qualité des eaux à atteindre pour la vie piscicole. Le modèle est donc alimenté par deux types de paramètres : ceux qui sont considérés comme fixes (facteurs naturels auxquels nous ajoutons le paramètre limite maximale de risque) et ceux qui sont variables (la pression polluante et la largeur de la bande enherbée). Les différents scénarios consistent à modifier l'un des paramètres variables pour avoir l'effet sur l'autre. Il s'agit donc de déterminer la largeur de la bande enherbée en fonction du niveau de la pression polluante. Couplé à un SIG le modèle permettra de visualiser la variabilité de la largeur de la bande enherbée le long des cours d'eau. A l'inverse on pourra aussi déterminer le niveau de la pression polluante admis connaissant la largeur de la bande enherbée. De ce point de vue le modèle pourra offrir une possibilité de choix aux exploitants agricoles dans un contexte de pression foncière élevée. En effet il pourra opter de réduire les dimensions de la bande enherbée en compensation d'une diminution de la pression polluante. Cette souplesse qu'offre cet outil constitue un atout dans le milieu paysan où les exploitants agricoles sont confrontés à diverses contraintes.

Figure 13 : Schéma conceptuel de détermination de la largeur de la bande





Source : Auteur

**Pression
polluante**

Limite maximale de
risque

CHAPITRE VII : STRUCTURATION ET PRESENTATION DE L'INFORMATION GRACE AU MODELE

Un modèle ne vaut que par l'information qu'il met à la disposition de l'utilisateur. Un volet important de la modélisation est l'organisation de cette information pour la rendre accessible et pertinente à un grand nombre d'utilisateurs. L'objectif du modèle c'est d'aider les gestionnaires de l'environnement en général et ceux des ressources aquatiques à prendre de bonnes décisions. Les informations qui doivent découler de ce modèle ne doivent pas concerner seulement la largeur de la zone tampon à mettre en place. En plus de cette information capitale le modèle doit pouvoir fournir un certain nombre d'informations sur les parcelles à risque de pollution, les portions de cours d'eau vulnérables à la pollution.

VII.1. Processus de construction de l'information

Le schéma de la figure 14 présente et hiérarchise, sous une forme simplifiée, les principales étapes pour structurer l'information. Ces différentes étapes nécessitent des choix en matière d'objectifs, de méthode de travail et de critères de sélection. En partant de la base vers le sommet de la pyramide :

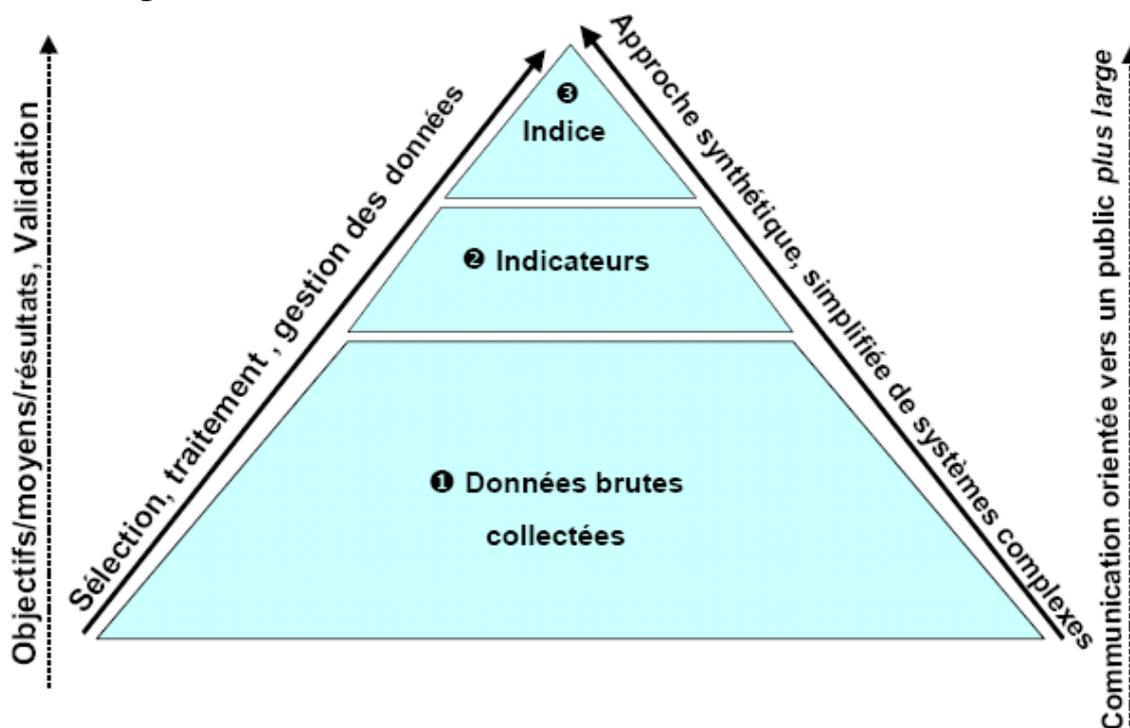
- le traitement de l'information est plus finalisé ;
- l'information est plus condensée, agrégée et simplifiée ;
- la représentativité sur le plan de l'espace et du temps et des structures peut être plus importante ;
- la fonction de communication est privilégiée.

Il est donc possible de mettre en évidence plusieurs niveaux distincts d'information.

Première étape : collecte des données brutes

Les données brutes stockées dans une base de données, donnent une information élémentaire le plus souvent chiffrée mais parfois qualitative.

Figure 14 : Organisation de l'information



Source : Adapté d' IFEN, 1999

Deuxième étape : Construction de l'indicateur

L'indicateur donne une information liée à la caractérisation d'un phénomène. Il est élaboré en vue du pilotage, de l'évaluation et de la communication sur une action menée. Son contenu est plus riche : il a une valeur significative, c'est-à-dire de portée supérieure à celle des données mobilisées.

Troisième étape : Construction de l'indice

L'indice offre une information et une communication sur un sujet ou une situation évolutive, voire une classification. Il donne, par agrégation de données ou d'indicateurs

hétérogènes, une approche résumée et simplifiée de systèmes complexes et vise un large public. Selon la littérature les indices sont peu utilisés en environnement car les spécialistes sont rarement en accord avec son contenu et sa construction. De ce qui suit nous pensons que l'indicateur est le niveau de structuration de l'information le plus pertinent.

VII.2. Définition d'un indicateur

Selon l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE, 1993), un indicateur est un paramètre ou une valeur dérivée de paramètres donnant des informations sur un phénomène.

La notion utilisée par l'Institut Français de l'Environnement (IFEN, 1999) pour ses travaux est : Un indicateur est une information quantitative, synthétique, caractérisant un phénomène souvent complexe. Elle est mobilisée à des fins de diagnostic, de communication ou d'aide à la décision. Un indicateur est donc une information issue d'une modélisation de données.

VII.3. Caractéristiques d'un indicateur

Plusieurs auteurs s'accordent sur la définition des caractéristiques fondamentales à l'élaboration d'un indicateur (Girardin et al., 1997) : l'indicateur doit être adapté à l'objectif fixé, spécifique de cet objectif, validé, fiable, précis, mesurable, facile à utiliser tout en restant pertinent. Selon B. Kestemont, (2007) les indicateurs sont présentés sous plusieurs formes :

- nombres répartis dans des listes d'indicateurs pour chaque problématique ;
- indicateurs synthétiques, indices ;
- présentations graphiques.

VII.4. Approche Pression-Etat-Réponse

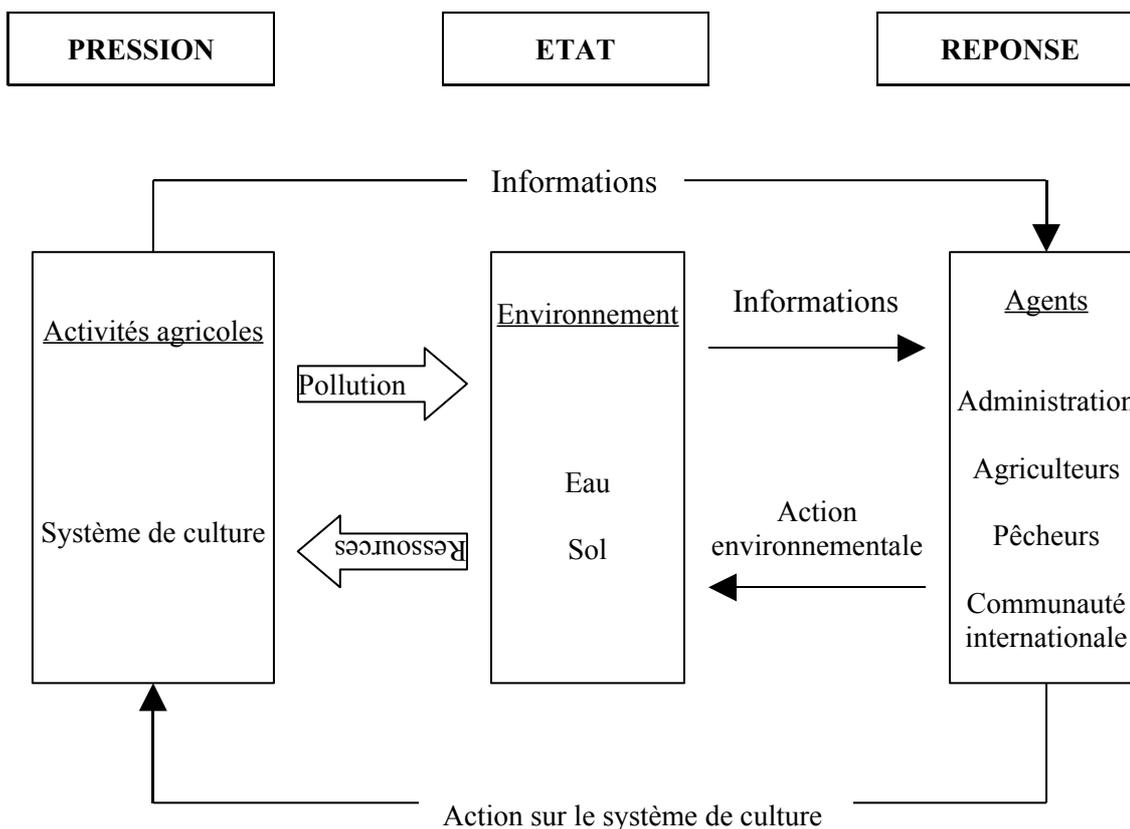
Pour une utilisation internationale ou nationale, les indicateurs environnementaux sont souvent organisés selon différentes structures : Pression - Etat - Réponse (OCDE, 2000).

Par exemple, la quantité de produits phytosanitaires épandus constitue un indicateur de pression. La qualité de l'eau à l'exutoire du bassin versant représente l'état de l'environnement relatif au phénomène envisagé, la concentration d'un produit phytosanitaire est un indicateur d'état. Les décisions relatives aux usages des pesticides

comme la dose réglementaire d'application, sur le bassin versant correspondent à des indicateurs de réponse.

La classification Pression - Etat - Réponse (fig. 15) permet de recouvrir la diversité des questions à aborder et d'aller au delà des indicateurs de pratiques agricoles : il s'agit de guider une action en vue d'améliorer les pratiques et d'orienter les systèmes de production. Cette classification constitue un outil d'évaluation des mesures de protection de l'eau mises en œuvre. Le tableau III donne un aperçu des indicateurs qui peuvent être générés par le modèle.

Figure 15 : Une représentation simplifiée de l'approche Pression - Etat - Réponse dans le cas des pollutions de l'eau provenant des activités agricoles



Source : Adapté de CORPEN, 2003

Tableau III : Structuration de l'information pouvant être produite par le modèle.

	PRESSION	ETAT	REPONSE
INDICES	- Indice de pression phytosanitaire	- Indice probabiliste de qualité d'habitat - Indice de qualité des eaux - Indice de vulnérabilité des eaux	- Indice d'application des mesures - Taux d'évolution des différents indices
INDICATEURS	- Quantité de pesticide / ha - Quantité de matière active / ha - Quantité de matière active / tonne de production	- Risque potentiel de pollution des eaux - Risque réel de pollution des eaux - Vulnérabilité des parcelles - Taux d'échantillon d'eau contaminé - Taux d'échantillon de poisson contaminé	- Largeur de la bande enherbée - Superficie de la bande enherbée - Taux de couverture du bassin versant en bande enherbée - Taux d'évolution des risques de pollution - Taux d'évolution de la vulnérabilité - Taux d'adoption des bandes enherbées
DONNEES BRUTES	- Nom pesticide - Matières actives - Toxicité - Mobilité - Persistance - Bioaccumulation - Superficie traitée - Pluviométrie	- Teneur en éléments pesticides des eaux - Résidus en pesticides dans les poissons - Nombre d'échantillons d'eau contaminés - Nombre d'échantillons de poisson contaminés	- Nombre d'exploitants ayant adopté les bandes enherbées - Les limites maximales de résidus - Subventions pour la mise en place des bandes enherbées - Pénalités pour défaut de bandes enherbées - Nombre de formations dispensées aux exploitants agricoles

Source : Auteur

VI.5. Limites du modèle

Les principales limites du modèle sont ci-dessous décrites.

- La connaissance encore incomplète des phénomènes complexes conduisant au transfert des pesticides vers les eaux de surface limite la fiabilité du modèle. Certains phénomènes comme la direction et la vitesse du vent n'ont pas été intégrés. En outre la dérive des pesticides et la contamination des eaux par drainage souterrain ne sont pas pris en compte.
- La validation rigoureuse des résultats du modèle nécessite d'avoir recours à des analyses de la qualité de l'eau qui est une opération coûteuse.
- Le modèle n'intègre pas la dimension temporelle alors que les quantités de pesticides entraînés par ruissellement dépendent fortement du temps écoulé entre la date de traitement et les pluies.
- La dimension socio-économique n'est pas intégrée dans le modèle. Dès lors, on ne peut ni évaluer le coût lié à l'établissement d'une bande enherbée, ni calculer le coût des impacts causés aux ressources piscicoles.
- Les poids à attribuer aux différents facteurs sont subjectifs même si cette attribution est faite par des experts.

VI.6. Conclusion partielle

Le modèle est une représentation de la réalité. Cette vision réductrice de la réalité constitue sa première limite. Couplé à la géomatique le modèle constitue néanmoins un outil puissant pour les scientifiques et gestionnaires dans la prise de décisions pertinentes sur des bases scientifiques. C'est un outil de diagnostic à l'échelle du bassin versant et parcellaire. Les indicateurs doivent être un moyen constructif de dialogue entre la profession agricole, l'administration et la société. Un projet SIG ne se limite pas seulement à la conception du logiciel. L'organisation mise en place pour permettre son implantation est déterminante pour sa réussite. La pertinence de l'outil est liée au contexte dans lequel il est utilisé. Ce contexte définit le cadre de son application. Dans la dernière partie du travail, nous allons définir le contexte ivoirien en matière de pollution des eaux de surface par les pesticides et le cadre mis en place en réponse à cette pollution. La connaissance de ce contexte est préalable à l'adoption du modèle.

<p style="text-align: center;">TROISIEME PARTIE : CADRE D'APPLICATION DU MODELE</p>
--

CONTEXTE ET MODALITES D'APPLICATION DU MODELE

CHAPITRE VIII. CONTEXTE DE L'ETUDE

L'état des lieux de la pollution des eaux de surface en Côte d'Ivoire permet de mieux appréhender le contexte du bassin versant du fleuve Bandama. Dans cette partie après une description de la situation ivoirienne, une monographie synthétique dudit bassin est présentée. Cette monographie fait ressortir les paramètres essentiels qui doivent servir au modèle.

VIII.1. Contexte général

La Côte d'Ivoire est un pays de l'Afrique de l'Ouest. Elle a une superficie de 322.463 km² avec plus de 16 millions d'habitants. Les ressources renouvelables totales en eau (surface et souterraine) s'élèvent à 77 milliards de m³ par an et les prélèvements à environ 38,4 milliards de m³ en 1998 (FAO, 2004). A côté de celle utilisée pour l'hydroélectricité (36,8 milliards de m³), 700 millions de m³ sont destinés à l'agriculture (FAO, 2004).

Selon le Ministère de l'Environnement et de la Forêt (MEF, 1999) quatre grands bassins hydrographiques se partagent le territoire national d'Ouest en Est (figure 14) : le Cavally, le Sassandra, le Bandama et la Comoé.

L'agriculture reste le moteur de l'économie ivoirienne. En 2003, l'agriculture, par le biais des productions de cacao, café, coton, huile de palme, bananes, ananas, agrumes, coprah etc. a contribué pour 28% au PIB, a représenté 60% des recettes d'exportation et occupé 45% de la population active (FAO, 2005).

Selon la FAO (2004), cité par Halle et al. (2006), l'économie agricole est répartie entre les cultures de rente (61,7%), céréalières, vivrières (33,4%), fruitières (2,8%), maraîchères (1,7%) et industrielles (0,4%). En 40 ans, la superficie agricole a presque quadruplée. Au recensement de 1998, il existait 1.128.898 ménages avec des agriculteurs.

La consommation nationale du poisson augmente depuis quelques années selon Halle. Selon lui cette consommation a été évaluée en 1999 à 275.660 tonnes pour une production locale de 79.164 tonnes. Les 72% restants sont comblés par les importations. Les activités de pêche continentale sont concentrées sur les lacs de Kossou (800 km²), de Buyo (600 km²), d'Ayamé (160 km²) et de Taabo (70 km²). Les retenues d'eau hydroélectrique et hydro-agricole ont augmenté le potentiel de la pêche continentale estimé à 26.000 tonnes/an (Halle et al.).

Figure 16 : Principaux bassins versants de la Côte d'Ivoire



Source : MEF, 1999, p. 12

VIII.2. Contexte du bassin versant du fleuve Bandama

VIII.2.1. Définition du bassin versant

La loi n°98-755 du 23 décembre 1998 portant Code de l'Eau définit en son article 1 le bassin versant ainsi : « aire géographique dont le relief détermine l'écoulement des eaux superficielles et des effluents de diverses natures vers un point de convergence ; ce point est appelé exutoire du bassin ».

Dans la pratique, il faut considérer que les bassins versants se constituent autour des principaux fleuves et de leurs affluents. Le bassin du fleuve Bandama, entièrement situé en Côte d'Ivoire, occupe une superficie de 97 500 km² entre 3° 50' et 7° Ouest et 5° et 10° 20' Nord. En raison de son orientation Nord-Sud, il recouvre donc des zones différentes sur le plan climatique et biogéographique.

VIII.2.2. Raisons du choix du bassin versant du fleuve Bandama pour l'étude

Un ensemble d'éléments a milité en faveur du choix du bassin versant du Bandama (fig. 17) comme zone pilote pour appliquer le modèle.

Des raisons opérationnelles, la tendance et les caractéristiques propres du bassin versant du Bandama ont présidé à ce choix :

VIII.2.2.1. Raisons opérationnelles

Les problèmes de pollution des eaux de surface par les pesticides concernent plusieurs échelles, du niveau moléculaire jusqu'à celui du grand bassin versant régional. Le bassin versant constitue la base de travail pour la connaissance et la compréhension du milieu, pour la prescription des systèmes d'exploitation et des contraintes liées au milieu et à son environnement socio-économique pour mettre en place des plans d'action. A cette échelle, l'objectif est d'effectuer un état des lieux de la contamination des eaux et une estimation des risques de transferts vers les eaux par caractérisation des facteurs de risque, permettant de faire des propositions d'actions pour la prévention de la contamination (CORPEN, 2001). A part de la fuite d'eau souterraine, le bassin versant

est une unité clairement définie. Il constitue donc une unité spatiale logique pour les études hydrologiques.

VIII.2.2.2. La tendance

Le principe de base d'une gestion intégrée des ressources en eau et de l'environnement à l'échelle du bassin versant est unanimement admis en Côte d'Ivoire. Les limites du territoire de gestion sont celles du bassin hydrographique (Djouka, 1998). Pour traduire cette volonté politique dans les faits un Haut Commissariat à l'hydraulique (HCH), a été créé en 1996 sous la tutelle du Cabinet du Premier Ministre. Il est chargé de la politique nationale du secteur de l'eau et est responsable de la restructuration institutionnelle du secteur qui a eu lieu en 1998. Son rôle est de mettre en place un cadre institutionnel adéquat apte à prendre en charge les problèmes spécifiques de l'eau et de l'assainissement, et à assurer une gestion intégrée des ressources en eau par bassin versant. Le regroupement se fera autour de trois délégations de régions hydrauliques épousant les aires géographiques des trois grands bassins hydrologiques (Comoé-Agnéby, Bandama-Boubo, Cavally-Sassandra) (FAO, 2005). Treize districts hydrauliques correspondant aux sous-bassins des trois grands bassins versants hydrologiques sont proposés. Le cadre institutionnel de gestion pourrait s'organiser autour de trois entités

VIII.2.2.3. Les caractéristiques propres au Bassin versant du fleuve Bandama

Trois caractéristiques propres au bassin versant du fleuve Bandama militent en sa faveur dans le choix :

1) Bassin versant entièrement ivoirien

Le bassin versant du fleuve Bandama est le seul grand bassin versant dont toute l'étendue se trouve sur le sol ivoirien. C'est un avantage comparatif pour les projets de gestion intégrée par bassin versant. En effet on a une maîtrise des processus de prise de décision et les acteurs sont plus proches. On évite ainsi les difficultés liées aux fonctionnements institutionnels souvent contradictoires des pays partageant le même bassin versant.

2) Bassin versant abritant une variabilité agro écologique

Le bassin versant du fleuve Bandama s'étend du Nord au Sud de la Côte d'Ivoire. Toutes les zones agro écologiques du Nord au Sud s'y retrouvent. Cette variabilité des paramètres offre un excellent cadre de simulation du modèle.

3) Bassin versant bénéficiant de nombreuses études

Depuis une quinzaine d'années, le fleuve Bandama a fait l'objet d'études partielles ou limitées: en hydrologie, hydrogéologie et ichtyologie (Lévêque et al., 1983). C'est le seul fleuve en Côte d'Ivoire à avoir bénéficié d'autant d'études. La dernière en date est celle de Fofana (2005) intitulée « Contribution de l'information spatiale à la gestion intégrée du bassin du fleuve Bandama ». Selon lui les objectifs poursuivis par cette étude sont la surveillance des aménagements hydroélectriques existants (Kossou et Taabo), la contribution à l'établissement de la carte de sismicité de la Côte d'Ivoire et la sensibilisation contre les actions humaines susceptibles d'accroître les risques sismiques dus à l'action de l'eau (déforestation, érosion...).

Une base de données existe donc pour ce bassin versant. Cette base doit être mise à jour et enrichie pour lui permettre d'alimenter le modèle qui sera mis en place.

Figure 17 : Bassin versant du fleuve Bandama



Source : Lévêque, 1983, p. 5

Tableau IV : Monographie synthétique du bassin versant du Bandama.

DENOMINATION	COMPOSANTES	CARACTERISTIQUES	SOURCES
Hydrographie et hydrologie	Fleuve principal	- Banadama : longueur : 1050 Km ; bassin versant de : 97 500 km ²	MEF, 1999
	Principaux affluents	- N'Zi : longueur : 725 km ; Sous bassin versant : 35.500 km ² - Marahoué : longueur : 550 km ; Sous bassin versant : 24.300 km ² - Bandama blanc : longueur : 1050 km ; Sous bassin versant : 38.500 km ²	MEF, 1999
	Régime hydrologique	- Partie septentrionale du bassin : crue unique d'août à octobre - Partie centrale du bassin : deux crues en juin-juillet et en septembre-oct.	Levêque et al., 1983
	Composantes physico-chimiques des eaux	- pH varie entre 7,0 et 7,5 au cours de l'année - Température : 24-25 ° C (décembre et janvier) et 31-32 ° C (avril-mai)	Levêque et al., 1983
Géologie et géomorphologie	Les roches	Roches basiques au Nord ; roches granitiques au Centre ; roches métamorphiques schisteuses au Sud et roches sédimentaires sur le littoral	Levêque et al., 1983
	Le sol	- Sols ferallitiques dans la majeure partie du bassin versant - Sols hydromorphes observés dans le Bas Bandama	Levêque et al., 1983
	Topographie	- Pente douce de 400 m au nord à moins de 100 m au sud - Succession de collines plus ou moins subaplanies	Levêque et al., 1983
Climat	Saisons, précipitations annuelles et températures	- Domaine soudanais : précipitations entre 900 et 1700 mm ; température : 26° C à 27°5 C - Secteur mésophile du domaine guinéen : précipitations annuelles entre 1200 et 1800 mm ; température : 14° C à 33° C - Secteur ombrophile du domaine guinéen : Précipitations annuelles entre 1600 et 2500 mm ; température : 25° C à 33° C	MEEF, 2000

Tableau IV : Monographie synthétique du bassin versant du Bandama (suite).

DENOMINATION	COMPOSANTES	CARACTERISTIQUES	SOURCES
--------------	-------------	------------------	---------

Peuplements ichtyologiques	Espèces	- 95 espèces inventoriés dont : <i>Aleste spp</i> ; <i>Petis Barbus</i> ; <i>Charachidae nain</i> ; <i>Cyprinodontidae</i> ; <i>Hepsetus odeo</i> ; <i>Schilbe mystus</i> ; <i>Tilapia spp</i> ; <i>Labeo parvus</i> ; <i>Schilbe mystus</i> , <i>Lates niloticus</i> , <i>Clarias lazera</i> - Espèces introduites : <i>Oreochromis niloticus</i> et <i>Heterotis niloticus</i>	MEF, 1999
	Régime alimentaire	- Invertébrés benthiques (mollusques, Ostracodes, larves d'insectes) - Végétaux supérieurs (jeunes tiges, graines, fruits, feuilles) - Poissons, alevins et détritux animaux - Zooplancton	FAO, 1996
	Période de reproduction	Saison pluvieuse : Mai à Septembre pour la plupart	Levêque et al.,
Activités humaines	Aménagements hydrauliques	- 184 barrages pour 6910 ha aménagés - Classification par usage : 32 agricole, 3 adduction d'eau potables, 5 piscicole, 1 électrique, 137 pastoral, 6 mixte	MEF, 1999
	Pollutions par pesticides	- Cultures industrielles intensives en pesticides (canne à sucre, coton, ananas, banane, palmier à huile) - Tous les échantillons de sédiments analysés (9) contiennent des résidus de pesticides - 2/3 des poissons prélevés contiennent des résidus de pesticides au dessus de la limite maximale	LABECO, 1996

Source : Auteur

VIII.2.3. Monographie du bassin versant du fleuve Bandama

Les différentes caractéristiques du bassin versant sont consignées dans le tableau IV et en annexe III.

Le bassin versant du fleuve Bandama est une unité représentative de la diversité des écosystèmes et des problématiques de leur gestion en Côte d'Ivoire. De ce point de vue, il est tout indiqué pour abriter des projets pilotes de gestion de bassin versant avant de les étendre à l'ensemble du pays. Du fait de son emprise nationale, nous allons faire l'état des lieux de l'utilisation des pesticides dans le bassin versant à travers un diagnostic national.

VIII.3. Diagnostic de l'utilisation des pesticides en Côte d'Ivoire

Pour réaliser ce diagnostic nous allons utiliser l'approche Pression-Etat-Réponse expliquée dans la deuxième partie de ce document. Cette approche nous permet de parcourir tous les facteurs qui interviennent dans l'utilisation des pesticides et leurs interrelations.

VIII.3.1. La pression polluante en Côte d'Ivoire

Cette pression polluante varie d'une zone agro écologique à l'autre, et d'un système de culture à l'autre (voir tableau V, fig.18 figure et annexe II).

VIII.3.1.1. Zone agro-écologique soudanaise

Cette zone s'étend du Nord au centre de la Côte d'Ivoire. Dans cette partie du pays, les cultures de canne à sucre et du coton sont les principales consommatrices des pesticides. Selon UNIPHYTO (1997), en 1995, l'intensité d'utilisation des pesticides pour le coton est de 19,6 kg /ha (tableau V). Cette forte intensification s'explique par les crédits en pesticides accordés aux exploitants par les compagnies cotonnières. Par contre la canne à sucre est exploitée par des complexes agro-industriels modernes dont les capitaux appartiennent aux privés.

Tableau V : Niveau d'utilisation des pesticides par culture en 1995

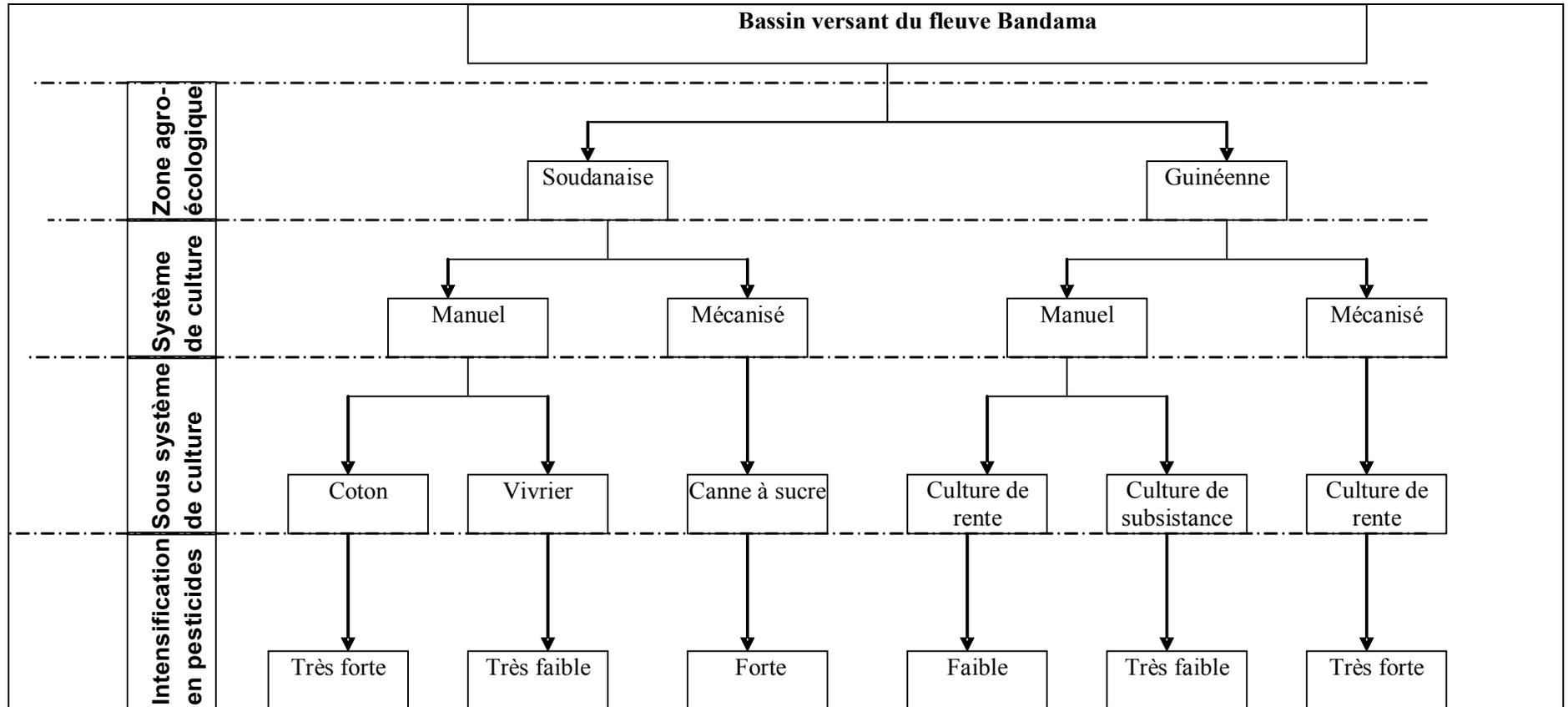
Cultures	Superficie (Ha)	Quantité de pesticide utilisé (Kg)	Intensité d'utilisation des pesticides (Kg/Ha)	Rang par Intensité d'utilisation
Coton	242	4745,62	19,61	3 ^{ème}
Banane	6	505,8	84,3	1 ^{er}
Cacao	1500	300	0,2	7 ^{ème} ex
Riz	650	195	0,3	6 ^{ème}
Ananas	6	153,6	25,6	2 ^{ème}
Café	1385	138,5	0,1	9 ^{ème}
Canne à sucre	21	71,4	3,4	4 ^{ème}
Palmier à huile	148	29,6	0,2	7 ^{ème}
Hévéa	59	23,6	0,4	5 ^{ème}

Source : Adapté de UNIPHYTO, 1997, p. 34

VIII.3.1.2. Zone agro écologique guinéenne

La zone agro écologique guinéenne s'étend du centre au sud de la Côte d'Ivoire. Cette zone est dominée par des cultures d'exportation. Le climat et la proximité du port d'Abidjan ont favorisé le développement de ces cultures. La banane constitue la culture la plus exigeante en pesticides (83,4 kg/ha selon UNIPHYTO), suivie de l'ananas (25,6 kg/ha). Du fait de sa culture en zones humides ou en bordure des cours d'eau, le système de culture de la banane constitue une réelle menace sur les écosystèmes aquatiques.

Figure 18 : Intensité d'utilisation des pesticides par zone agro-écologique



VIII.3.2. Etat de contamination des eaux de surface du bassin versant du fleuve Bandama

Actuellement, la zone maraîchère est contaminée très faiblement. A l'inverse, les zones à proximité des cultures d'ananas, de bananes, de coton et de cacao présentent sans exception des traces de plusieurs pesticides (LABECO, 1996). La contamination de l'eau par les produits chimiques se traduit souvent par une accumulation biologique dans les poissons et dans d'autres organismes aquatiques, parfois à des concentrations biologiquement actives. Parmi les pesticides, la plupart des substances du groupe des organochlorés sont bien connues comme étant persistantes et s'accumulant dans la chaîne de nourriture. On trouve des résidus d'organochlorés aussi dans les sédiments des fleuves, des lacs et de la lagune d'Abidjan. L'analyse des 9 échantillons dans le bassin versant du fleuve Bandama a relevé que tous les sédiments contiennent des résidus de Lindane, α -HCH, Heptachlore, Aldrine et Dieldrine et deux tiers aussi DDT (LABECO 1996, voir l'annexe VII). Dans les mêmes zones, les poissons prélevés systématiquement (45 échantillons) contiennent dans tous les cas des résidus de plusieurs organochlorés. Deux tiers de poissons prélevés ont eu des résidus d'un ou de plusieurs organochlorés au dessus de la limite maximale (voir tableau VI).

Tableau VI : Prélèvements des poissons avec résidus dans le bassin versant du fleuve Bandama

Pesticide	Concentrations (en ppm) des résidus	Nombre d'échantillons contenant des résidus (total: 45)	Limite des résidus maximale (LMR) (mg/kg)*	Nombre d'échantillons au-dessus de la LMR (total: 45)
α -HCH	0,0000-0,8075	27	0,2	27
Lindane	0,0000-0,4076	36	0,5	0
ϵ -HCH	0,0000-0,3035	26	0,2	3
Heptachlor	0,0000-0,0419	40	0,2	0
Aldrine/ Dieldrine	0,0000-0,7105/ 0,0000-0,0428	45/ 40	0,2	1
OP'-DDT/ PP-DDT	0,0000-0,0403/ 0,0000-0,6115	25/ 27	5	0
Total		45/45		30/45

Source : LABECO, 1996

* Limite de l'Union Européenne.

Ces résultats sont confirmés par des analyses de LABECO en plusieurs années dans d'autres échantillons. A côté des organochlorés, des résidus élevés d'organophosphorés, surtout le parathion-ethyl ont été trouvés (MINAGRA, 1998).

Calamari (1985) indique qu'au cours d'une enquête qui a duré trois ans, on a relevé, sur plusieurs stations ou rivières, une diminution des captures par unité d'effort et une diminution des facteurs de condition du poisson. Ces auteurs ont mentionné parmi les causes possibles de ces phénomènes, l'emploi de pesticides. Calamari révèle en outre que dans les zones polluées, plusieurs cas de nanisme ont été observés chez le poisson, la maturité sexuelle intervenant quand le poisson a une taille de 6 - 8 centimètres au lieu de la taille normale de 13 à 15 centimètres.

Certes les sources de contamination peuvent être diverses (agricole, pêche, lutte contre l'onchocercose), mais la nature des contaminants et les pratiques agricoles recensées incriminent l'agriculture.

VIII.3.3. Réponse à la pollution des eaux par les pesticides en Côte d'Ivoire

Face aux risques de pollution des eaux de surface par les pesticides la Côte d'Ivoire n'a pas apporté une réponse ciblée et spécifique. Les outils pouvant permettre de lutter contre cette pollution se trouvent dans plusieurs instruments : institutionnel, réglementaire et technique.

VIII.3.3.1. Cadre institutionnel

La gestion de l'environnement, étant donné son caractère transversal, fait intervenir plusieurs ministères et structures. Cependant, la conception et la mise en oeuvre de la politique nationale pour la protection de l'environnement et la gestion des ressources en eau sont à la charge du Ministère de l'Environnement, des Eaux et des Forêts. Nous évoquerons ici les deux principaux ministères les plus impliqués dans la gestion des pesticides et des eaux de surface.

Les ministères en charge de la protection des eaux de surface

- Le Ministère de l'environnement et des forêts et sa Direction de l'environnement sont chargés de proposer une politique des rives, du littoral et des plans d'eaux, de la mettre en œuvre et d'en coordonner l'exécution. Ce ministère dispose des structures directement impliquées dans la gestion et la surveillance des pesticides et des eaux. Au nombre de ces structures on cite :

- L'Agence Nationale de l'Environnement (ANDE) : a pour missions d'assurer la coordination de l'exécution des projets de développement à caractère environnemental, garantir la prise en compte des préoccupations environnementales dans les projets et programmes de développement, de veiller à la mise en place et à la gestion d'un système national d'information environnementale, de mettre en oeuvre la procédure d'études d'impact ainsi que l'évaluation de l'impact environnemental des politiques macroéconomiques,

- Le Centre Ivoirien Anti-Pollution (CIAPOL) a pour missions le contrôle et la surveillance de la pollution des milieux aquatiques et atmosphériques. Aujourd'hui, ses activités sont essentiellement axées sur la surveillance de la qualité des eaux continentales et lagunaires.

- Le Ministère de l'Agriculture dont l'un des objectifs est de parvenir à une pratique raisonnée de l'agriculture respectueuse de l'environnement a créé en son sein une Sous Direction de l'environnement en 2003. Depuis fin 2005, cette entité administrative a démarré ses activités. Des structures sous tutelle, comme l'ANADER (Agence Nationale d'Appui au Développement Rural) mènent des actions de vulgarisation des bonnes pratiques agricoles et d'encadrement des populations rurales. Elles bénéficient du soutien du LANADA (Laboratoire National d'Appui au Développement Agricole) qui possède sept laboratoires thématiques dont l'écotoxicologie. Ce ministère comprend aussi la Direction des productions halieutiques. Il est chargé entre autres de la gestion et du suivi des ressources halieutiques.

- **Comité pesticide**

Les homologations et les autorisations provisoires de vente sont accordées par arrêté du Ministre de l'Agriculture et des Ressources Animales sur proposition d'un comité interministériel dit Comité Pesticides. La présidence de ce comité est assurée par le

Ministre de l'Agriculture et des Ressources Animales tandis que le Secrétariat Permanent est assuré par la Direction de la Protection des Végétaux et de la Qualité

Nouvelle orientation

Selon la FAO, (2005) pour assurer l'efficacité de la gestion des ressources en eau il sera procédé à une réforme institutionnelle qui se traduira par la création d'agences de bassin qui géreront la ressource en eau par bassin versant (voir la partie I.2.2.2.). Le regroupement se fera autour de trois délégations de régions hydrauliques épousant les aires géographiques des trois grands bassins hydrologiques (Comoé-Agnéby, Bandama-Boubo, Cavally-Sassandra). Treize districts hydrauliques correspondant aux sous-bassins des trois grands bassins versants hydrologiques sont proposés. Toujours selon la FAO le cadre institutionnel de gestion pourrait s'organiser autour de trois entités:

- une Autorité de l'eau assumant les prérogatives de l'administration;
- une Agence de l'eau dotée de l'autonomie de gestion et placée sous la tutelle de l'Autorité de l'eau; elle aurait entre autres compétences celle de gérer les fonds collectés;
- une entité consultative composée d'un conseil interministériel et d'un comité de l'eau.

VIII.3.3.2. Cadre législatif

La Côte d'Ivoire dispose en matière de la gestion des pesticides un ensemble de lois, de codes, de décrets et arrêtés qui permettent, quand ils sont bien appliqués, de garantir le bon usage de ces substances dans un environnement sain. Elle adhère aux accords internationaux sur les pesticides notamment :

- le Code de Conduite de la FAO ;
- la Convention de Rotterdam sur la procédure de consentement préalable en connaissance de cause applicable à certains produits chimiques et pesticides dangereux qui font l'objet d'un commerce international ;
- la Convention sur la Diversité Biologique de Rio ;
- La Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants.

Les décrets et lois se présentent comme suit :

La loi n° 98 –755 du 23 Décembre 1998 portant Code de l’Eau précise en son article 5 que la gestion intégrée de l’eau en général (ressources en eau, des aménagements et ouvrages hydrauliques) vise à assurer la protection de l’eau contre toute forme de pollution et l’alimentation en eau potable de la population, la préservation de leur santé...

La loi n° 96-766 du 3 octobre 1996 portant Code de l’Environnement, consolide entre autres, la gestion des produits chimiques. Il couvre tous les secteurs d’utilisation des produits chimiques (gestion des déchets, de l’air, la pollution de l’eau, les pesticides, les engrais, etc...). Tous les aspects et principes fondamentaux de l’environnement sont intégrés dans la planification de la prévention de la pollution, de la qualité du milieu, et de l’utilisation rationnelle des substances chimiques toxiques.

Le décret 89-02 du 4 janvier 1989 relatif à l’agrément de la fabrication, la vente et l’utilisation des pesticides qui tient compte des recommandations de la FAO sur les produits agropharmaceutiques.

La loi 88-651 du 7 juillet 1988 portant protection de la Santé Publique et de l’Environnement contre les effets des déchets industriels, toxiques et nucléaires et des substances nocives.

Ces différents instruments juridiques ont contribué à la mise en place d’une procédure d’homologation des pesticides (annexe V) assortie d’une liste de produits homologués (annexe VI).

VIII.3.3.3. Réponse technique à la pollution des eaux par les pesticides

Cette réponse se manifeste à travers les systèmes de culture à faible intensité d’utilisation des pesticides. De nombreuses méthodes de lutte existent dans la littérature. Le Centre National de Recherche Agronomique a élaboré de nombreux systèmes de culture à faible utilisation de pesticide. La lutte biologique et la lutte intégrée sont les deux méthodes transférées à la vulgarisation agricole à travers l’ANADER. Mais le souci premier des chercheurs et vulgarisateurs a été d’ordre économique : permettre aux

exploitants démunis de protéger leurs cultures avec des méthodes accessibles et à faible coût. Les préoccupations environnementales étaient reléguées au second plan.

Malgré les bonnes intentions que ces méthodes véhiculaient leur adoption par les paysans est faible. En témoigne le programme appelé "Gestion Intégrée des Déprédateurs". Depuis 1995, la méthode de lutte appelée "Gestion Intégrée des Déprédateurs" a été introduite par la FAO en Côte d'Ivoire pour soutenir et promouvoir la production du riz, et en irrigué en particulier. Ce programme a abouti à la formation de 17 cadres ivoiriens formateurs qui ont formé à leur tour 161 paysans et ont installé huit champs-écoles-paysans dans les périmètres rizicoles. Le programme est actuellement confié à l'ANADER qui poursuit la vulgarisation et l'encadrement des paysans. Cette méthode de lutte reste confinée dans les champs d'école. Les paysans ne l'ont pas approprié. Sa complexité est l'une des raisons de cette faible adoption.

VIII.3.3.4. Faiblesses de la réponse à la pollution des eaux de surface

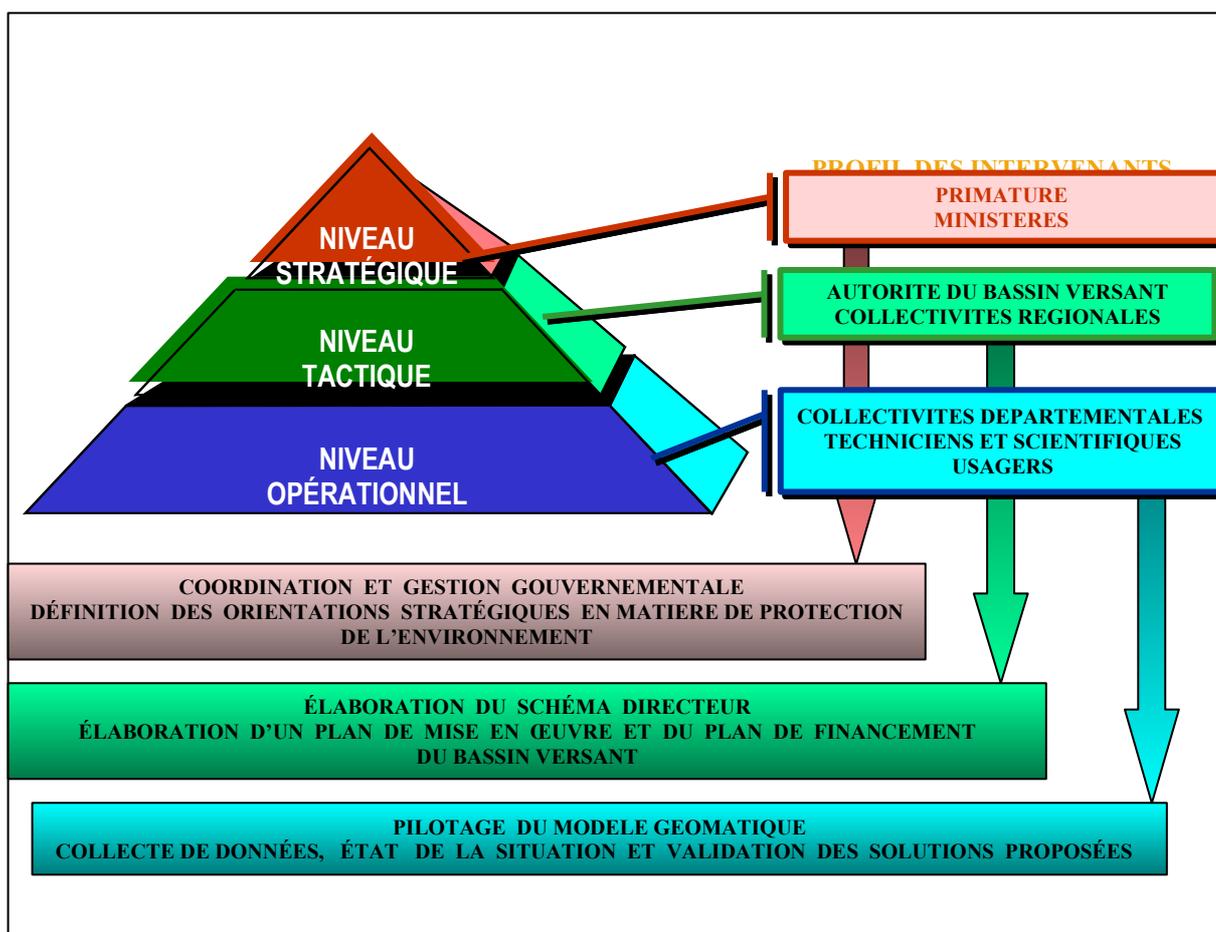
L'une des premières faiblesses constatées est la place peu honorable qu'occupe l'environnement dans les priorités des décideurs. En effet face à de nombreux défis, l'environnement semble être relégué au dernier plan. Malgré l'arsenal juridique mis en place, aucun progrès ne sera fait. En effet le cadre juridique souffre d'un manque de décrets d'application. Les autres difficultés découlent de cette faiblesse. La recherche scientifique qui doit éclairer les décisions est peu présente dans le débat sur les pesticides en milieu aquatique. On note aussi un manque de coordination entre les institutions dans les actions de lutte contre la pollution. A titre d'illustration, l'agence chargée de l'environnement n'a aucune relation professionnelle avec celle chargée de la vulgarisation dans le secteur agricole considéré comme pollueur de l'écosystème aquatique.

Dans ce contexte d'inertie, comment procéder à l'implantation des bandes enherbées dans le bassin versant pour rendre efficace la lutte contre les pollutions des eaux ?

CHAPITRE IX : PROCESSUS DE PLANIFICATION DE L'IMPLANTATION DES DISPOSITIFS ENHERBES

L'objectif du modèle est d'orienter les gestionnaires du bassin versant dans leur prise de décision. Les décisions suivent donc un processus où interviennent différents acteurs à chaque étape. Dans cette partie nous présentons d'abord l'approche pyramide de gestion qui permet de mieux expliquer ce processus et d'indiquer à quelle échelle de prise de décision le modèle peut intervenir. Ensuite nous indiquerons comment le modèle pourrait contribuer à compléter et à affiner les divers instruments de lutte existants contre la pollution des eaux de surface par les pesticides.

Figure 19 : Pyramide de gestion



Source : Adapté de Bénéié, 2006, p. 5

IX.1. Pyramide de gestion

La pyramide de gestion est un concept très largement accepté et utilisé dans la plupart des domaines. Elle est constituée de trois niveaux : le niveau de gestion stratégique, le niveau de gestion tactique et le niveau de gestion opérationnel. A ceux-ci sont associés des horizons de planification qui correspondent respectivement aux échéanciers de long terme, de moyen terme et de court terme (figure 19).

IX.1.1. Planification stratégique

Elle fixe les grandes orientations permettant aux décideurs de modifier et d'améliorer ou de conforter leur position face à une situation donnée. Elle correspond à une planification à long terme de l'aménagement du bassin versant, qui se traduit par des plans directeurs. En Côte d'Ivoire le secteur de l'agriculture et celui de l'eau possèdent des cadres généraux d'orientation. En effet la politique de protection végétale, qui est intégrée dans un cadre de politique agricole et environnementale, vise deux objectifs spécifiques:

- éviter que l'intensification des systèmes de production à peu d'intrants externes ne mène à une dépendance des pesticides chimiques;
- briser "la spirale chimique" en cours qui caractérise les cultures telles que le coton, la banane, et la cacao, et ramener ces systèmes sur le chemin de la gestion durable des ressources. Au niveau de l'eau la politique ivoirienne se traduit par la gestion intégrée de l'eau par bassin versant. Toutes ces dispositions sont favorables à l'implantation des bandes enherbées mais l'utilisation de la géomatique n'est pas indispensable à cette échelle de prise de décision.

IX.1.2. Planification tactique

Elle correspond à la planification normative détaillée traduite dans les plans d'aménagement. Ces plans sont basés sur des informations plus spécifiques relatives au territoire et à son équipement. Dans les deux cas, la formulation est plus précise que

celle de la planification stratégique. La localisation spatiale devient plus explicite. A ce niveau le bassin versant du fleuve Bandama n'est pas encore doté d'un plan précis d'aménagement. Certes plusieurs études scientifiques y ont été menées mais les résultats restent épars. Aucune structure de coordination n'existe pour capitaliser les acquis de toutes ces études. La constitution d'une base de données unique est un début de solution. A ce stade, la modélisation du bassin versant est d'un apport réel.

IX.1.3. Planification opérationnelle

Elle consiste à formuler les objectifs à court terme et à déterminer les actions qui en découlent sous une forme très précise et très ciblée. La localisation spatiale est précise et détaillée. Il s'agit d'une activité qui exige une interprétation à grande échelle des plans d'aménagement. Des informations très détaillées sur l'état d'équipement du territoire au niveau local sont donc nécessaires. C'est le niveau par excellence de l'implantation de notre modèle couplé au SIG qui permet d'identifier les parcelles de cultures comportant des risques de pollution et de proposer les dimensions d'une bande enherbée appropriée.

IX.2. Contribution du modèle à la mise en œuvre des instruments de lutte contre la pollution des eaux piscicoles par les pesticides

Le paysage juridique en matière de protection des eaux de surface contre la pollution des pesticides n'est pas vierge. De nombreux instruments existent mais ils sont inapplicables par manque de décrets d'application. Ces décrets d'application doivent s'appuyer sur des bases scientifiques. Dans ce contexte le modèle contribuera à rendre opérationnels ces instruments en posant les bases scientifiques des décisions à prendre.

Tableau VII : Contribution du modèle à l'utilisation effective des instruments de lutte contre la pollution des eaux en Côte d'Ivoire

INSTRUMENTS	CONTENU	CONTRIBUTION DU PROJET
Réglementaires	<ul style="list-style-type: none"> •Normes : Il sera défini des normes de qualité des eaux et de rejets (code de l'eau art. 34, 37, 49) •Interdiction : Il est interdit toutes activités susceptibles de nuire à la qualité des eaux (code de l'environnement art.13, 75, 79 et code de l'eau art.35, 48) •Pénalités : Il est institué des amendes et des peines d'emprisonnement à toutes personnes coupables de pollution des eaux de surface (code de l'environnement art. 97 et code de l'eau art.121) 	<p>Le projet contribuera à élaborer des indicateurs et des normes en fonction de l'état de l'environnement, et des exigences écologiques des espèces piscicoles de chaque bassin versant ou sous bassin versant.</p> <p>Il permettra une surveillance des cours d'eau</p>
Economiques	<ul style="list-style-type: none"> •Incitatifs : L'Etat peut allouer des primes à toute activité écologiquement « propre » et encourager à la création de label pour les produits respectant les normes (code de l'environnement art. 49 et code de l'eau art. 100) •Taxes / redevance : Principe « pollueur-payeur » (code de l'environnement art.35) 	<p>Le projet peut contribuer à identifier et à classer les parcelles et les sous bassins versants en fonction de leur contribution à la pollution des eaux. Sur une base scientifique les bénéficiaires des primes et aides seront connus.</p>

Tableau VII : Contribution du modèle à l'utilisation effective des instruments de lutte contre la pollution des eaux en Côte d'Ivoire

(suite)

INSTRUMENTS	CONTENU	CONTRIBUTION DU PROJET
Informationnels et éducationnels	<ul style="list-style-type: none"> •Education : Introduction de l'éducation relative à l'environnement dans les programmes scolaires (code de l'environnement art.63) •Sensibilisation : la sensibilisation environnementale incombe à l'Etat et aux collectivités locales (code de l'environnement art.72) 	Le modèle constitue un outil puissant de formation des vulgarisateurs agricoles et des exploitants agricoles à travers les simulations des pratiques culturales et leurs effets sur la vie des poissons
Techniques : bandes enherbées	<ul style="list-style-type: none"> •Institution des périmètres de protection des eaux de surface (code de l'environnement art.51 et code de l'eau art.34 et 36) •Définition de trois types de périmètres de protection : protection immédiate, rapprochée et éloignée (code de l'eau art.38) 	Le modèle contribuera à élaborer les décrets d'application en précisant les largeurs des zones enherbées en fonction de la spécificité de l'unité de gestion ciblée.

Source : Auteur

Le cadre institutionnel, juridique et économique existe pour permettre l'instauration des dispositifs bande enherbée dans le bassin versant du fleuve Banadama (tableau 7). Pour assurer l'adhésion des acteurs, condition essentielle de la réussite du projet, il faut prendre et appliquer certaines dispositions.

X. RECOMMANDATIONS GENERALES

L'usage de la géomatique comme celui des bandes enherbées dans la lutte contre la pollution des eaux de surface est quasi inexistant en Côte d'Ivoire. La géomatique reste une technologie inaccessible à plusieurs acteurs et institutions en charge de l'environnement. Les mesures de lutte contre la pollution sont faiblement appliquées et on note une absence de système de suivi et de contrôle. Pour toutes ces raisons, le rôle de l'Etat doit être accru. D'autres acteurs doivent y contribuer.

X.1. Intervention de l'Etat

X.1.1. La réglementation

Le cadre réglementaire en matière de protection des ressources existe mais les textes d'application font défaut. L'Etat doit s'atteler à élaborer les textes d'application en précisant les largeurs des zones de protection citées dans les différents codes de l'eau et de l'environnement. La réglementation doit définir aussi les normes de qualité d'eau piscicole.

La mise en place des bandes enherbées constitue un aménagement durable. Pour l'exploitant agricole c'est un investissement à long terme. Pour ce fait, il doit bénéficier d'une sécurité foncière. La loi sur le foncier rural a été promulguée mais les problèmes techniques et politiques retardent son application. L'Etat doit prendre les dispositions nécessaires à l'application de cette loi qui garantit la sécurité foncière aux ayants droits.

La gestion des ressources en eau par bassin versant peut engendrer des conflits de compétences entre l'autorité du bassin versant et la gouvernance locale des ressources.

En effet le bassin versant couvre un ensemble d'entités décentralisées possédant chacune une vision et un plan d'aménagement du territoire non concertés. Cette diversité de visions au niveau du même bassin versant pourrait constituer une source de difficultés pour l'autorité du bassin versant du fleuve Bandama. Des dispositions réglementaires doivent être prises pour clarifier le rôle de chaque acteur.

X.1.2. Leviers économiques

Les instruments économiques pour une meilleure protection des ressources piscicoles par les agriculteurs peuvent prendre plusieurs formes : les taxes, les amendes et les subventions.

Les taxes présentent un handicap. En effet, dans un environnement de pauvreté grandissante où les revenus agricoles baissent régulièrement, l'augmentation du coût des pesticides par des taxes est inopportune. Elles contribueraient à faire baisser le pouvoir d'achat des exploitants dans un pays où l'agriculture reste la principale source de revenu.

Les amendes dans notre contexte peuvent être appliquées conformément aux dispositifs réglementaires en vigueur. Dans ce cadre, tout exploitant ne respectant pas les normes de rejet des pesticides dans les cours d'eau devrait être amendé. Le modèle géomatique contribuera à déterminer ces normes et à indiquer aussi les dimensions réglementaires des bandes enherbées.

Les subventions peuvent prendre la forme d'aide à la mise en place des bandes enherbées. Elles peuvent aussi être orientées à récompenser les agriculteurs ayant respecté les dimensions et l'entretien de ces bandes. L'aide peut s'étendre aux groupements ou coopératives d'agriculteurs qui dans un sous bassin versant donné possèderaient les bandes tampon enherbées respectant les normes. On pourra aussi lier les crédits à la présence de bande enherbée dans les exploitations agricoles à risque.

X.1.3. La Recherche/Développement

Le développement des technologies de l'information à référence spatiale comme la géomatique est une réalité les pays du nordiques. Pour exemple, de nombreux modèles hydrauliques couplés au SIG ont été élaborés par les chercheurs du Nord. Mais ces technologies sont calibrées selon le standard de ces pays. Les pays du Sud comme la Côte d'Ivoire doivent adapter ces outils à leur contexte à travers des projets de recherche. Cela passe par une formation des ressources humaines hautement qualifiées capables de concevoir des projets géomatiques à la dimension des réalités socio-économiques du pays.

Actuellement les seules structures qui oeuvrent dans le domaine de la recherche en géomatique sont le Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) et le Bureau National d'Études Techniques et de Développement (BNEDT). Mais les résultats sont fragmentaires et épars et peu utilisables par les gestionnaires de l'environnement. Cela dénote de l'absence d'une politique cohérente en matière de recherche géomatique. L'Etat pourrait donc mettre en place une véritable politique de développement de la géomatique. La première étape serait de créer un cadre institutionnel qui sera chargé de conduire la politique de développement de la géomatique. La deuxième étape permettra d'identifier toutes les compétences en matière géomatique, les besoins informationnels et les potentiels consommateurs des produits informationnels de la géomatique. La troisième étape consisterait à attribuer des normes aux différentes données afin de les rendre compréhensibles et utilisables par l'ensemble des acteurs. Il faut donc une politique commune en matière de données. Enfin il faudrait créer un environnement économiquement incitatif à l'acquisition des données, à leur traitement et à leur diffusion.

De nombreuses zones d'ombre persistent encore dans les processus de transfert des pesticides vers les cours d'eau. Même ceux qui sont connus et expliqués dans la littérature méritent des investigations scientifiques dans le contexte ivoirien. Ces investigations pourraient se porter sur la détermination des effets des pesticides sur les espèces de poissons endogènes ; sur le comportement réel des pesticides dans nos conditions climatiques et pédologiques ; sur le type de couverture herbacée de la bande.

Ces informations précises et contextualisées permettront de calibrer le modèle et de le valider.

X.1.4. La sensibilisation, l'éducation et la formation

Le bassin versant du fleuve Bandama regroupe plusieurs acteurs aux intérêts souvent divergents. Les animaux pourraient par exemple nuire au développement des bandes enherbées si les éleveurs ne sont pas sensibilisés et associés au projet. De plus les bandes enherbées sont une pratique nouvelle pour les agriculteurs. Comme toute innovation l'adoption du dispositif doit passer par une phase de sensibilisation. Le cadre adéquat à la sensibilisation et à la formation est l'éducation relative à l'environnement. C'est un projet qui doit associer des ministères de l'agriculture le ministère des ressources animales et halieutiques le ministère de l'environnement et des eaux et forêts et le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique. Comme stratégie d'approche le projet doit signer un partenariat entre les agences agricole (ANADER) et environnementale (ANDE) en vue d'intégrer l'Education relative à l'Environnement dans le conseil agricole. La finalité du projet sera d'inculquer une conscience environnementale aux conseillers agricoles en vue de l'émergence d'agriculteurs soucieux de la protection de l'intégrité écologique des espèces piscicoles. Le développement de connaissances et le renforcement des compétences des conseillers agricoles aux thématiques relatives à la protection de l'intégrité écologique du poisson seront les objectifs à poursuivre. L'introduction des bandes enherbées dans le paysage agricole doit constituer un volet important de ce projet.

X.1.5. Organisation institutionnelle

Pour les institutions déjà existantes dont les domaines de compétence se chevauchent, il est important de créer un cadre unique de concertation. En effet le ministère de l'agriculture poursuit des objectifs d'amélioration de la productivité agricole. Bien qu'utilisant le slogan d'agriculture durable, aucune action n'est visible sur le terrain. D'un côté les vulgarisateurs agricoles continuent de diffuser les thèmes productivistes sans tenir compte des impacts potentiels sur l'environnement et de l'autre côté les agents du ministère de l'environnement font campagne pour une agriculture

respectueuse de l'environnement. Une harmonisation des approches pourrait réduire les coûts d'intervention sur le terrain et rendre plus crédible le message du gouvernement pour une agriculture respectueuse de l'environnement. Il faut aussi rendre opérationnelle l'autorité du bassin versant qui sera chargée de conduire toute la politique de gestion du bassin versant. Un tel projet sur les bandes enherbées doit s'insérer dans un plan global de gestion du bassin versant. L'organisation institutionnelle se caractérise aussi par la création d'une nouvelle institution chargée de piloter la politique géomatique de la Côte d'Ivoire.

X.2. Les mesures de facilitation et les autres intervenants

D'autres mesures pourront contribuer à faciliter l'application des bandes enherbées. Il s'agit de l'organisation du monde paysan et les acteurs non gouvernementaux.

X.2.1. L'organisation des agriculteurs

Les coopératives agricoles doivent constituer les portes d'entrées de toute innovation. En Côte d'Ivoire le paysage agricole est dominé par les coopératives. Leur rôle se cantonne à la collecte et à la vente des produits agricoles. D'autres plus performantes font bénéficier à leurs membres des crédits de campagne sous forme de liquidité financière ou d'intrants agricoles. Les champs d'action de ces coopératives peuvent s'élargir à la formation de leur membre sur les pratiques agricoles saines. Pour cela, le renforcement institutionnel doit constituer une priorité. Les coopératives pourront jouer pleinement leur rôle dans l'adoption des pratiques bande enherbée par les membres.

X.2.2. La participation de la société civile

Les agriculteurs doivent être au centre des mesures de protection des ressources piscicoles contre la pollution des pesticides. Ces mesures doivent associer aussi d'autres usagers des ressources du bassin versant comme les éleveurs et les pêcheurs. En effet les pêcheurs locaux ont une connaissance certaine sur les conditions écologiques des espèces piscicoles. Les éleveurs quant à eux devraient s'abstenir de détruire les bandes

enherbées par leur bétail. Un cadre de concertation entre ces différents acteurs participera à une meilleure compréhension des enjeux. Des ONG nationales et internationales possèdent des compétences dans l'approche participative de la gestion des ressources. Ces organisations sont regroupées pour la plupart en collectifs :

- Collectif des ONG actives en Côte d'Ivoire (CONGACI)
- Réseau des ONG d'environnement (RECI)
- WWF et Conservation Internationale

Toutes ces ONG pourront donc initier des programmes de sensibilisation et de formation de ces différents acteurs.

X.2.3. La coopération internationale

La géomatique est un domaine qui connaît un développement perpétuel. La coopération entre les chercheurs du Sud et ceux du Nord pourraient faciliter le transfert du savoir, des aptitudes et des technologies nécessaires, et promouvoir les échanges. Ces contacts pourraient prendre la forme de conférences, de symposiums et d'échanges d'experts, mais également de projets pilotes ou de démonstrations conjoints.

La mise en œuvre des conventions internationales offre un cadre de coopération internationale fructueuse. Le projet de bandes enherbées pourrait s'inscrire dans la convention sur la diversité biologique.

X.3. Conclusion partielle

En Côte d'Ivoire, la gestion des ressources en eau par bassin versant est l'approche choisie par les décideurs. Le bassin versant du fleuve Banadama présente des zones de fortes concentrations d'activités agricoles qui sont sources de pollution des eaux de surface. Les poissons ne sont pas épargnés par ces activités polluantes. Le cadre réglementaire et institutionnel ivoirien sur la protection des eaux est bien fourni. Il prévoit entre autres dispositions, l'application des mesures post application des pesticides. La bande enherbée peut être mise en œuvre dans le cadre d'une application effective de ces mesures réglementaires. Le modèle proposé s'il est finalisé, pourra aider les décideurs à définir les modalités de leur application.

CONCLUSION GENERALE

Le transfert des pesticides dans les milieux aquatiques, le mécanisme d'interception de ces pesticides par les bandes enherbées, l'écotoxicologie des poissons sont des phénomènes complexes qui suscitent encore des recherches approfondies. Le modèle conceptuel de la bande enherbée présenté dans ce document est un effort de présentation de cette complexité.

Des possibilités d'amélioration du modèle sont nombreuses. En effet on pourra y intégrer le comportement des agriculteurs, les données économiques et temporelles. On peut envisager aussi un modèle fédérateur qui intègre les différents compartiments de l'environnement concernés par le transfert des pesticides (air, eau, sol). Du travail reste encore à faire pour rendre opérationnel le modèle. Il faut en effet réaliser d'abord un modèle informatique, ensuite le calibrer et enfin le valider. Au stade final de sa réalisation, il sera certes imparfait, mais son utilisation à des fins de recherches scientifiques et de décisions de gestion sera intéressante. En plus, il constituera un référentiel commun, sous forme cartographique, favorable au dialogue et à la concertation entre acteurs par l'approche à échelles multiples (parcelle, exploitation, sous bassin, versant et bassin versant).

En Côte d'Ivoire, les mesures de réduction de la pollution des eaux de surface sont essentiellement en amont. Mais, la dépendance de l'agriculture vis-à-vis des pesticides et la faiblesse du contrôle des molécules de pesticides par le pays doivent inciter les décideurs à accorder une importance aux mesures post application. La bande enherbée dispose d'un cadre réglementaire pour sa mise en œuvre. Cependant une volonté politique et une participation des parties prenantes, constituent des facteurs conditionnant l'adoption des mesures bandes enherbées. Une capitalisation des connaissances scientifiques sur le devenir des pesticides et sur la biologie des espèces ichthyologiques doit être faite. Des recherches sur le fonctionnement des bandes enherbées dans les conditions locales doivent être aussi entreprises. Il y'a donc autant de pistes de recherche à explorer pour rendre efficace la préservation de la vie aquatique des cours d'eau en Côte d'Ivoire.

LISTES DES REFERENCES

- ARLA, *Proposition de stratégie sur les zones tampons en milieu agricole*, Canada, 2005, en ligne, consulté le 12 décembre 2006, site : www.pmra-arla.gc.ca.
- ARORA A. et MICKELSON K., «Transaction of the ASAE», *Herbicide retention by vegetative buffer strips from runoff under natural rainfall*, vol. 39, 1996, pp.155-162.
- AUBERTOT J. et al., « Pesticides, agriculture et environnement », *Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux*, rapport d'expertise scientifique collective, INRA et Cemagref France, 2005, en ligne, consulté le 14 janvier 2007, http://www.inra.fr/1_institut/missions_et_strategie/
- BENIE G., *Géomatique appliquée à l'environnement*, Notes de cours à l'Université Senghor d'Alexandrie, 2006, 10 p.
- BENOIT P. et al., « Isoproturon sorption and degradation in a soil from grassed buffer strip », *Journal of Environmental Quality*, vol. 28, 1999, pp.1-9.
- CALAMARI D., *Situation de la pollution dans les eaux intérieures de l'Afrique de l'ouest et du centre*, documents occasionnels du Comité des Pêches Continentales pour l'Afrique (CPCA), FAO,1985, 122 p.
- CALVET R. et al., « Mise au point bibliographique : adsorption des pesticides par les sols et leurs constituants », *Annales Agronomiques*, vol.3, 1980, pp. 239-257.
- CARSON R., *Printemps silencieux* ; trad. de « Silent Spring », Houghton Mifflin, Boston 1962, 368 p.
- COLIN F., *Approche spatiale de la pollution chronique des eaux de surface par les produits phytosanitaires cas de l'Atrazine dans le bassin versant du Sousson*, Thèse (Dr.), ENGREF, 2000, 255 p.
- CORPEN, *Produits phytosanitaires et dispositifs enherbés - Etat des connaissances et propositions de mise en œuvre*. MAP – MATE, 1997, 88 pp.
- CORPEN, *Diagnostic de la pollution des eaux par les produits phytosanitaires : bases pour l'établissement de cahiers des charges des diagnostics des bassins versants et des exploitations*, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Paris, 2001, 34 p.
- CORPEN, *Des indicateurs pour des actions locales de maîtrise des pollutions de l'eau d'origine agricole : éléments méthodologiques application aux produits phytosanitaires*. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation de la Pêche et des Affaires Rurales, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Paris, 2003, 28 p.
- COSTE L., *Sur plusieurs définitions du risque et leurs conséquences en matière de prévision, prédiction et prévention*, La Houille Blanche, vol.2, 2001,16–22 pp.

-
- DABNEY S. et al., « Depositional patterns of sediment trapped by grass hedges », *Transaction of the ASAE*, vol. 38, 1995, 171- 172 pp.
- DILLAHA T. et al., « Vegetative filter strips for agricultural nonpoint source pollution control », *American Society of Agricultural Engineers*, vol.32, 1989, 513 – 519 pp.
- DJOUKA A., *Stratégies pour une gestion durable de l'eau et moyens de financement appropriés*, Les documents de travail international, de la Conférence "Water and Sustainable Development", Paris, 1998, 55 pp.
- DOMANGE N., *Etude des transferts de produits phytosanitaires à l'échelle de la parcelle et du bassin versant viticole*, Thèse (Dr.), Université Louis Pasteur Strasbourg I, 2005, 328 p.
- FAO, Système d'Information sur l'Eau et l'Agriculture (AQUASTAT), 2005, en ligne, consulté le 23 novembre 2006, <http://www.fao.org/landandwater/>.
- FOFANA M., *Contribution de l'information spatiale à la gestion intégrée du bassin du fleuve Bandama*, Communication lors du Tiger workshop, Frascati, Italia, 2005, 10 p.
- GIRARDIN P., et al., « Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems », *European Journal of Agronomy*, vol. 7, 1997, 261-271 pp.
- GIROUX I., *La présence de pesticides dans l'eau en milieu agricole au Québec*, Ministère de l'Environnement, Direction du suivi de l'état de l'environnement, Québec, 2004, 40 p., en ligne, http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua
- HAINAUT J., *Base de données et modèle de calcul : Outils et méthodes pour l'utilisateur* 3^{ème} édition, 2002, 130 p.
- HALLE B., et BRUZON V., *Profil Environnemental de la Côte d'Ivoire*, rapport final, 2006, 133 p.
- IFEN, *La diffusion de l'information sur l'environnement ou les produits du reporting environnemental*, notes de méthodes, numéro 12, 1999, 85 p.
- KESTEMONT B., *Bases de données, traitement de l'information et indicateurs de développement durable*, note de cours à l'Université Senghor, 2007, 59 p.
- KULSHRESTHA S.K. et ARORA A., *Impairment caused by sublethal doses of two pesticides in ovaries of freshwater teleost Channa striatus*, Publ-Dept. Zool. Toxicol, vol. 20, 1984, 93–98 pp.

-
- LABECO, *Etude de la contamination par les résidus organochlorés de trois biotopes aquatiques de la région de Buyo à travers les matrices poissons (Tilapia sp) et sédiments*, Abidjan, 1996, 125 p.
- LACAS JC., *Processus de dissipation des produits phytosanitaires dans les zones tampons enherbés*, Thèse (Dr), Université Montpellier II, 2005, 310 p.
- LEVEQUE C. et DEJOUX C., « Limnologie du fleuve Bandama, Côte d'Ivoire », *Cahier d'Hydrobiologie*, O.R.S.T.O.M., vol. 100, 1983, pp.113- 141.
- LOWRANCE R. et al.,. "Herbicide transport in a managed riparian forest buffer system", *Transaction of the ASAE*, vol. 40, 1997, 47- 57 pp.
- MEF, *Diversité biologique de la Cote d'Ivoire*, rapport de synthèse ,1999, 273 p.
- MENEF et PNUE, *Plan national de mise en œuvre de la convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants*, Abidjan, 2006,144 p.
- MENEF, *Communication nationale initiale de la Côte d'Ivoire*, Convention Cadre des Nations Unies Sur les Changements Climatiques, Abidjan, 2000, 97 p.
- MENGL, *Guide d'interprétation du Décret de désignation du secteur protégé des bassins hydrographiques du Nouveau-Brunswick*, Canada, en ligne, consulté le 11 novembre 2006 , <http://www.gnb.ca/0009/0371/0004/0001-f.asp>.
- MENQ, *Proposition de bandes de protection du milieu aquatique au groupe de travail interministériel*, Québec, 1998, 71 p.
- OCDE, « Corps central d'indicateurs de l'OCDE pour les examens des performances environnementales », *Monographie sur l'environnement*, vol. 83, Paris, 1993, 65 p.
- OCDE, *Indicateurs environnementaux pour l'agriculture, Méthodes et résultats*, volume 3, Paris, 2003, 428 p.
- RADOUX M., *Qualité et traitement des eaux*, notes de cours à l'Université Senghor d'Alexandrie-Egypte, 2006, 300 p.
- RAMADE F., *Ecologie appliquée*, Ediscience International, Paris, 1989, 79 p.
- RAMADE, F., *Précis d'écotoxicologie*, Ed. Masson, Paris, 1992, 299 p.
- RICHARD Y. et GIROUX I., *Impact de l'agriculture sur les communautés benthiques et piscicoles du ruisseau Saint-Georges* (Québec, Canada), Ministère de l'Environnement, Direction du suivi de l'état de l'environnement, Québec, 2004, 28 p., en ligne , consulté le 20 octobre 2006, <http://www.mddep.gouv.qc.ca/>

-
- SCHMITT T. et DOSSKEY M.G., « Filter strip performance and processes for different vegetation, widths, and contaminants », *Journal of Environmental Quality*, vol. 28, 1999, 147 – 148 pp.
- STOECKEL D.M. et MUDD E.C. « Degradation of persistent herbicides in riparian wetlands » *American Chemical Society, Phytoremediation of soil and water contaminants*, 1997, 114 – 132 pp.
- THERIAULT M., *Système d'information géographique. Concepts fondamentaux*. Notes de cours n° 12 , Université Laval, Québec, 1996, 45 p.
- TRAORE K., *Etat de connaissances sur les pêcheries continentales Ivoirienne*, FAO, 1996, en ligne, consulté le 12 janvier 2007, <http://www.fao.org/docrep/field/009/ag188f>
- UNIPHYTO, *Sommaire du marché phytosanitaire en Côte d'Ivoire*, Rapport non publié, Abidjan, 1997, 90 p.
- VOLLE M., *A propos de modélisation*, 2004, en ligne, consulté le 18 /10/2006 <http://www.volle.com/travaux/cdc.htm>
- WENGER S., *A review of the scientific literature on riparian buffer width, extent and vegetation*, Institute of Ecology University of Georgia, 1999, 59 p

ANNEXES

ANNEXE I: Bioaccumulation du DDT

Chaîne alimentaire	Quantité de DDT	
		coefficient de (ppm) bioaccumulation
Eau	0,000003	1
zoo et phyto plancton	0,04	1 333
poisson herbivore	0,5	166 666
poisson Carnivore	2	666 666
oiseau mangeur de poisson (balbuzard)	25	8 333 333

Source : Que sais-je? L'écotoxicologie - PUF n°2931 / février 1995 d'après G. Tyler Miller - Living in the environment, Wadsworth Publishing Company, Belmont, Etats Unis, 1994

ANNEXE II : Niveau d'utilisation des pesticides par filière de production agricole

Filière	Structure	Problèmes Phytosanitaires	Utilisation des pesticides
Ananas	Grandes plantations industrielles et petits planteurs, regroupés à l'OCAB. L'exportation des produits vers l'Europe. (6.000 ha)	Nématodes: pratylenchus synphytes; mauvaises herbes	Très intensive: herbicides, nématicides, régulateurs de croissance
Banane	Grandes plantations industrielles et petits planteurs, regroupés à l'OCAB. L'exportation des produits vers l'Europe. (6.000 ha)	Nématodes: Radopholus similis Champignons: cercosporiose Insectes: charançons	Très intensive: nématicides, fongicides, herbicides, insecticides
Cacao	Petits et moyens planteurs indépendants et non-encadrés. Commercialisation organisée par la CAISTAB. (1,8 million ha)	Insectes: mirides	Limitée: insecticides actuellement utilisés sur 5-15% de la superficie
Café	Petits et moyens planteurs indépendants et non-encadrés. Commercialisation organisée par la CAISTAB. (1,5 million ha)	Insectes: scolytes	Rare: herbicides et insecticides
Coton	Petits planteurs encadrés par la CIDT. Produit pour la plupart exporté. (250.000 ha)	Insectes: jassides, pucerons, chenilles de capsule	Intensive: 6 applications systématiques d'insecticides, herbicides sur 1/3 de la superficie

Source : Analyse économique des Pesticides en Côte d'Ivoire, N°06/F-DVPQ, 1998

ANNEXE III : Zonation longitudinale des poissons dans le bassin du Bandama

ZONATION	MILIEU	ESPECES CARACTERISTIQUES
Zone de sources	ruisseaux ou mares	petits <i>BARBUS</i> <i>CHARACIDAE</i> nains <i>CYPRINODONTIDAE</i> <i>NEOLEBIAS SP</i>
Cours supérieur	petites vasques	<i>ALESTES LONGIPINNIS</i> <i>HEPSETUS ODOE</i> <i>SCHILBE MYSTUS</i> <i>SYNODONTIS SCHALL</i>
Cours moyen	alternance de vasques et de radiers	eaux profondes <i>ALESTES BAREMOZE</i> <i>ALESTES NURSE</i> <i>ALESTES MACROLEPIDOTUS</i> <i>HYDROCYNUS FORSKALII</i> <i>EUTROPIUS MENTALIS</i> eaux peu profondes <i>LABEO PARVUS</i> <i>MASTACEMBELUS NIGROMARGINATUS</i> <i>NANNOCHARAX SP</i> <i>ALESTES IMBERI</i> <i>TILAPIA SPP</i>
Cours inférieur	grandes vasques gradient de salinité	espèces continentales <i>ALESTES LONGIPINNIS</i> <i>HEPSETUS ODOE</i> <i>SCHILBE MYSTUS</i> <i>SYNODONTIS SCHALL</i> espèces estuariennes <i>ELOPS LACERTA</i> <i>GOBIUS GUINEENSIS</i>

Schéma de la zonation longitudinale des poissons dans le bassin du Bandama (d'après de Mérona, 1981).

Source : Christian Lévêque, Claude Dejoux et André Iltis ,1983. *Limnologie du fleuve Bandama, Côte d'Ivoire*. O.R.S.T.O.M., Hydrobiologie 100, 113- 141

ANNEXE IV : Eléments de biologie des principales espèces de poissons observés dans le bassin du Bandama

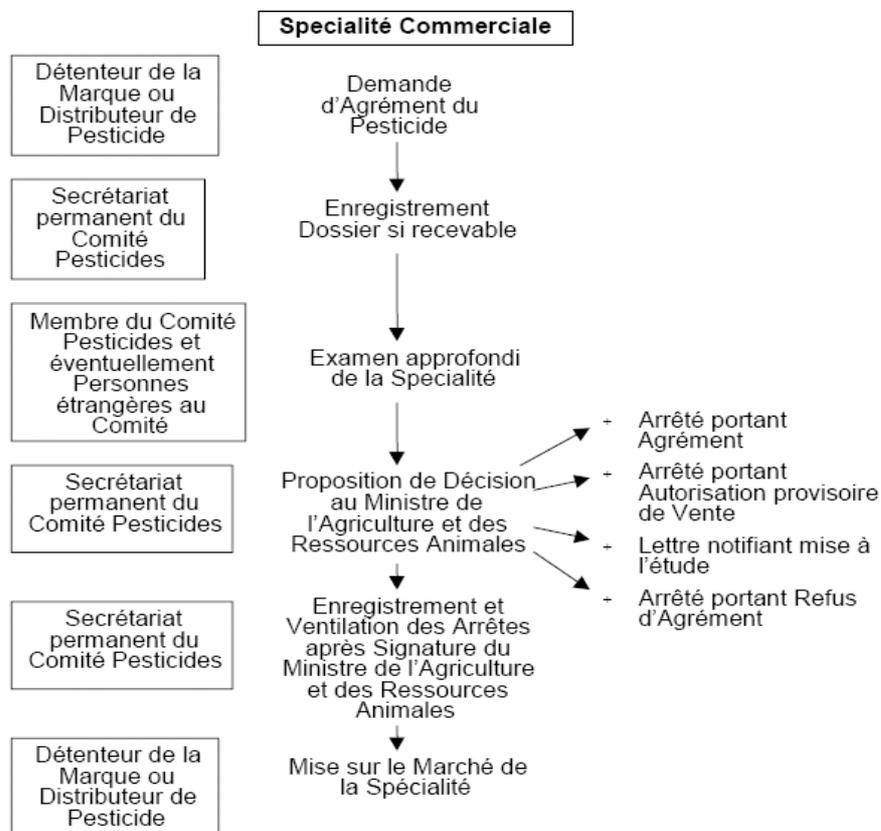
Tableau 1. Eléments de la biologie des principales espèces de poissons observées dans le bassin du Bandama.

Espèces	Période de reproduction	Fécondité relative: Nombre d'oeufs Kg de femelles	Régime alimentaire
Petrocephalus bovei	—	91 000	larves d'insectes aquatiques
Marcusenius bruyerei	—	52 000	invertébrés aquatiques (larves de chironomides)
Marcusenius funcidens	—	39 000	invertébrés aquatiques (larves de chironomides)
Hepsetus odoe	—	18 000	ichtyophage
Hydrocynus forskalii	—	127 000	poissons – crevettes
Alestes macrolepidotus	—	182 000	invertébrés aquatiques et terrestres-végétaux
Alestes baremoze	—	224 000	invertébrés aquatiques et terrestres
Alestes imberi	—	251 000	invertébrés aquatiques (larves d'insectes)
Alestes nurse	—	339 000	invertébrés terrestres et aquatiques
Labeo senegalensis	—	182 000	epiphytes – dept de fond
Labeo coubie	—	122 000	epiphytes – dept de fond
Labeo parvus	—	347 000	epiphytes – dept de fond
Chrysichthys velifer	—	20 000	invertébrés aquatiques (larves d'insectes)
Schilbe mystus	—	228 000	insectes terrestres et aquatiques
Eutropius mentalis	—	217 000	invertébrés terrestres et aquatiques-végétaux
Synodontis schall	—	157 000	invertébrés aquatiques (larves d'insectes)
Hemichromis fasciatus	—	30 000	
Pelmatochromis guentheri	—	8 000	
Tilapia zillii	—	39 000	végétaux
Polypterus endlicheri	—	15 000	

Source : Christian Lévêque, Claude Dejoux et André Iltis ,1983. *Limnologie du fleuve Bandama, Côte d'Ivoire*. O.R.S.T.O.M., Hydrobiologie 100, 113- 141

ANNEXE V : Les étapes de la procédure d'homologation en Côte

d'Ivoire



Source: DPVQ (1998)

ANNEXE VI : Liste des matières actives et situation d'homologation en

Côte d'Ivoire

Matière active	enregistré dans la liste de PIC	enregistré dans la liste de PAN	Situation de homologation des produits contenant la matière active en Côte d'Ivoire
Aldrine	oui	+	non homologué
Aldicarb	non	+	homologation conditionnelle ¹
Camphechlor (Toxaphene)	non	+	non homologué
Captafol	oui		homologation conditionnelle ²
Chlordane	oui	+	non homologué
Chlordimeform	oui	+	non homologué
Chlorobenzilate	oui		non homologué
DBCP	non	+	non homologué
DDT	oui	+	non homologué
Dieldrin	oui	+	non homologué
Dinoseb	oui		non homologué
EDB	oui	+	non homologué
Endrin	non	+	non homologué
Fluoroacetamide	oui		non homologué
HCH	oui	+	non homologué
Heptachlor	oui	+	homologation conditionnelle ³
Lindane	oui	+	homologué
mercure	oui		non homologué
methamidophos	oui ⁴		non homologué
monocrotophos	oui ⁴		homologation conditionnelle ¹
paraquat	non	+	homologué
Parathion-Ethyl	oui ⁴	+	homologué
Parathion-Methyl	oui ⁴	+	homologué
Pentachlorophenol	oui	+	non homologué
Phosphamidon	oui ⁴		non homologué
2,4,5-T	oui		non homologué

1 L'application est réservée à une équipe spécialisée.

2 Usage strictement restreint au traitement en hévéaculture.

3 Usage strictement restreint: uniquement réservé au traitement de semence de coton.

4 La procédure PIC s'applique pour certaines formulations.

PIC = Procédure d'Information et de Consentement Préalables de FAO/PNUE

Liste PAN = Matières actives inscrites dans la liste de Dirty Dozen de l'organisation non gouvernementale internationale Pesticide Action Network

Source: DPVQ (1998)

ANNEXE VII : Concentrations des ingrédients actifs herbicides détectés au cours des campagnes d'échantillonnage de l'eau de surface de 1992 à 2004 au Québec.

Herbicides (i.a.)	Gamme des concentrations détectées 1992-2004 (ug/l)	Critère pour la protection de la vie aquatique (ug/l)	Norme pour l'eau potable (ug/l)	Critère de qualité de l'eau pour l'irrigation (ug/l)
<i>Atrazine</i>	0,02 – 62,0 ¹	2,0	5,0	10,0
<i>Métolachlore</i>	0,01 – 41,0	8,0	50,0	28,0
<i>Imazéthapyr</i>	0,01 – 0,84	-- ²	--	--
<i>Bentazone</i>	0,03 – 49,0	510,0	--	--
<i>Dicamba</i>	0,03 – 6,6	10,0	120,0	0,006
<i>Glyphosate</i>	0,04 – 1,6	65,0	280,0	--
<i>Flumetsulam</i>	0,02 – 0,43	--	--	--
<i>Nicosulfuron</i>	0,01 – 0,56	--	--	--
<i>2,4-D</i>	0,02 – 4,1	47,0	100,0	--
<i>Diméthénamide</i>	0,02 – 130,0	5,6	--	--
<i>Mécoprop</i>	0,01 – 2,1	13,0	--	--
<i>MCPA</i>	0,01 – 7,0	2,6	--	0,025
<i>Clopyralide</i>	0,03 – 2,3	--	--	--
<i>Bromoxynil</i>	0,02 – 0,7	5,0	5,0	0,33
<i>Simazine</i>	0,01 – 3,73	10,0	10,0	0,5
<i>EPTC</i>	0,03 – 69,0	39,0	--	--
<i>Cyanazine</i>	0,03 – 11,0	2,0	10,0	0,5
<i>Métribuzine</i>	0,02 – 2,7	1,0	80,0	0,5
<i>Rimsulfuron</i>	0,01 – 0,26	--	--	--
<i>2,4-DB</i>	0,02 – 0,71	25,0	--	--
<i>2,4-DP</i>	0,02 – 0,37	--	--	--
<i>MCPB</i>	0,01 – 10,0	7,3	--	--
<i>Diuron</i>	0,25 – 0,9	1,6	150,0	--
<i>Butilate</i>	0,03 – 0,65	77,0	--	--
<i>Limuron</i>	0,04 – 4,5	7	--	0,071

¹ Le gras signifie qu'un des critères ou normes à été dépassé. ² -- Signifie pas de données.

Adapté de : Giroux *et al.*, 2006.

-- = unknown.

(1) Four acute degrees on mammal toxicology by pesticides; (I) LD50 smaller than 50 mg/kg weight, (II) LD50 between 50 and 500 mg/kg weight, (III) LD50 between 500 and 5000 mg/kg weight, (IV) LD50 larger than 5000mg/kg weight.

(2) Three fish toxicology categories on carps by pesticides; (A) LD50 concentration larger than 10ppm, (B) LD50 concentration between 10 and 0 5ppm, (C) LD50 concentration smaller than 0,5ppm.