

A:

Mes parents

Mon mari et ma fille Amina

Tous mes frères et sœurs musulmans

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier toutes les personnes qui n'ont ménagé aucun effort pour faire de ce travail une réussite. Il s'agit de :

- Monsieur Yacouba Konaté, Assistant de Recherche au 2iE qui malgré ses multiples préoccupations a accepté de suivre mes travaux avec patience tout en me prodiguant des précieux conseils,
- Madame Djakité / Salimata Koulibaly pour son appui constant
- Monsieur Mamadou Idriss Cherif pour son appui constant
- Monsieur Ahmadou Moussa pour son soutien moral

Qu'Allah bénisse tous ceux qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre.

Table des matières

Table des matières	3
Liste des figures	4
Liste des tableaux	4
Liste des abréviations:	5
Résumé	6
Introduction	8
Méthodologie	11
I.1 Généralités sur la pollution des eaux.....	13
I.1.1 Définitions	13
I.1.2 Les Types de pollution	14
I.1.2.1 La pollution chimique.....	14
I.1.2.2 La pollution physique	14
I.1.2.3 La pollution microbiologique	14
I.1.3 Mode de pollution	15
I.1.3.1 Les pollutions accidentelles	15
I.1.3.2 Les pollutions diffuses.....	16
I.1.3.3 La pollution naturelle.....	16
I.1.3.4 La pollution anthropique	16
I.1.4 Les polluants d'origine agricole :	18
I.1.4.1 Les pesticides ou produits phytosanitaires : Définitions et fonctions	18
I.1.4.1.1 Devenir des pesticides dans l'environnement :	20
I.1.4.1.2 La Pollution des eaux par les produits phytosanitaires appliqués sur les cultures : ...	23
I.1.4.1.3 Effet des produits phytosanitaires sur les eaux.....	27
(Superficielles et Souterraines)	27
I.1.4.2 Les nutriments : définitions et fonctions	28
I.1.4.2.1 La pollution des eaux par les nutriments	29
I.1.4.2.2 Effets des nutriments (azote et phosphore) sur les eaux (superficielles et souterraines).....	33
II.1 Cas de la contamination de l'eau souterraine par les pesticides en régions agricoles en Côte d'Ivoire (centre, sud et sud ouest).....	35
II.1.1 Introduction.....	35
II.1.2 Présentation des sites d'étude	35
II.1.3 Approche méthodologique (matériel et méthode).....	36
II.1.4 Résultats et discussion	37
II.1.5 Conclusion	41
II.2 Cas de la pollution agricole des eaux dans le bassin du Nakanbé: cas des réservoirs de Loubila et de Mogtédou (Burkina Faso)	42
II.2.1 Introduction.....	42
II.2.2 Approche méthodologique	42
II.2.3 Résultats/discussions	44
II.2.4 Conclusion	50
Conclusion générale	53
Sites internet	58

Liste des figures

Figure 1: La répartition mondiale des produits phytosanitaires par catégorie de produits en 2002.....	19
Figure 2: Pertes de produits phytosanitaires lors de l'application	24
Figure 3: Voies de transfert des pesticides vers les eaux superficielles et souterraines	26
Figure 4: Diffusion des polluants dans l'environnement à partir d'un entrepôt	27
Figure 5: Evaluation du C.R.U. (Coefficient Réel d'Utilisation) du phosphore lors de l'apport d'engrais par la méthode isotopique.....	33
Figure 6: Localisation des zones d'échantillonnage	36
Figure 7: Concentrations moyennes ($\mu\text{g/L}$) des principaux pesticides identifiés dans les eaux des puits des zones de BUYO, Grand LAHOU, YAMOOUSSOKRO et ABIDJAN	38
Figure 8: Contamination des zones agricoles par différentes familles de pesticides	40
Figure 9 : site d'étude.....	44
Figure 10: Variation de la teneur en nitrates, en ortho-phosphate et en sulfate en fonction du temps et de la station dans les réservoirs de Loumbila et de Mogtédó	47
Figure 11: variation de la teneur en chlorures, fluorures, sodium et potassium dans les eaux des réservoirs de Loumbila et de Mogtédó	48
Figure 12: variation de la teneur en fer dans les eaux des réservoirs de Loumbila et de Mogtédó	49

Liste des tableaux

Tableau 1: Origines et natures des différentes sources de pollution du milieu aquatique	15
Tableau 2: Quelques grandes familles de pesticides	20
Tableau 3: Bilan de contamination des puits échantillonnés par zone.....	38
Tableau 4: Comparaison inter zone (concentration de résidus en $\mu\text{g/L}$ dans un échantillon moyen).....	41
Tableau 5: Caractéristiques des eaux des réservoirs de Loumbila et de Mogtédó	45
Tableau 6 : Teneur moyenne en éléments dans les réservoirs de Loumbila et de Mogtédó (en mg/L).....	45
Tableau 7: Insecticides utilisés à Loumbila et à Mogtédó	50

Liste des abréviations:

µg/l: Microgramme par litre

µS/cm : Micro siemens par centimètre

Al: Aluminium

As: Arsenic

Cd: Cadmium

DCO : Demande chimique en oxygène

DDT : Dichloro-Diphényl-Trichloroéthane

DRAF: Direction Régionale de l'Agriculture et de la Forêt

HCH : Hexachlorocyclohexane

Hg: Mercure

Kd : coefficient de partage sol/eau

KH : constante de Henry

Koc : coefficient de partage carbone organique/eau

Kow : coefficient de partage octanol/eau

MES: Matières En Suspension

mg/l : Milligramme par litre

NTU: Nephelometric Turbidity Unit

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

O-phosph : Ortho-phosphates

Pb: Plomb

PCB : PolyChloroBiphényl.

pH : Potentiel d'hydrogène

Résumé

Une des conséquences environnementales majeures de l'agriculture intensive actuelle est la dégradation de la qualité des eaux de surface et souterraines, du fait de la dissémination des intrants agricoles, notamment les engrais et les produits phytosanitaires. Par l'effet de différents mécanismes (eaux de ruissellement, infiltration, volatilisation, absorption par les plantes, *etc.*), ces substances indésirables se retrouvent dans l'environnement atteignant différents milieux tels que les sols, les ressources en eau, l'atmosphère, voire l'homme à travers la chaîne alimentaire. Les pollutions diffuses d'origine agricole constituent de nos jours une des préoccupations majeures pour la préservation des ressources en eau. Comme il apparaît à travers des nombreuses études réalisées, ce phénomène prend de plus en plus de l'ampleur ces dernières années avec l'évolution des technologies et des pratiques agricoles. Il apparaît alarmant dans de nombreuses régions agricoles notamment en Côte d'Ivoire et au Burkina Faso. En effet, en Côte d'Ivoire, les cultures maraîchères et les plantations d'ananas, de café, de cacao et de bananes, par leur sensibilité aux nématodes, aux champignons et aux insectes, sont soumises à des traitements chimiques très intensifs, notamment aux nématicides et aux fongicides. Cela a eu pour conséquence la contamination des eaux souterraines notamment des puits, au niveau desquels divers types de résidus de pesticides (organochlorés, organophosphatés, carbamates ...) ont été détectés. De même au Burkina Faso, l'application excessive des engrais (NPK, NPKSB) sur des parcelles agricoles situées à proximité des réservoirs d'eau a conduit à l'eutrophisation des eaux de ces réservoirs. L'eutrophisation, constitue l'un des problèmes majeurs lié aux nutriments. Elle se produit lorsque l'eau s'enrichit artificiellement et excessivement en nutriments, provoquant une croissance anormale de la végétation. Elle peut être déclenchée par l'écoulement des engrais chimiques depuis les terres cultivées. Le processus d'eutrophisation entraîne des odeurs désagréables, une prolifération d'algues vertes, l'épuisement des réserves d'oxygène des eaux profondes et des modifications de la composition chimique de l'eau. Quant aux produits phytosanitaires, du fait de leur rémanence et de leur persistance, ils peuvent s'accumuler dans l'eau et freiner les processus d'autoépuration. De ce fait, ils peuvent se concentrer dans les organismes en bout de chaîne alimentaire, par bio-accumulation.

D'une manière générale, les pollutions d'origine agricole sont dues à l'usage irrationnel des intrants agricoles (pesticides et engrais). De ce fait, il convient d'adopter une meilleure gestion de ces intrants afin de préserver la qualité des eaux (superficielle et souterraines).

Mots clé : Pollution agricole, eaux de surface, eaux souterraines, intrants agricoles, eutrophisation, autoépuration, rémanence, persistance, bioaccumulation.

Introduction

L'eau est nécessaire pour tous les organismes vivants. Elle joue un rôle important dans un grand nombre de processus naturels et d'activités humaines, et est indispensable dans une multitude de réactions physiques et chimiques. L'eau des précipitations est utilisée directement par les cultures, mais, pour répondre aux besoins du bétail, des fermes, des ménages et des industries rurales, il faut en tirer des sources superficielles et souterraines [R1]. On la puise également de ces sources pour irriguer les champs dans les régions sèches. Donc, l'eau est une ressource indispensable tant pour la vie en général que pour les différentes activités humaines. En effet, les ressources en eau douce sont essentielles pour l'homme qui les sollicite fortement, notamment dans le cadre de ses activités agricoles.

Une des conséquences environnementales majeures de l'agriculture intensive actuelle est la dégradation de la qualité des eaux (Legg, 1997). Cette dégradation se traduit, pour les eaux de surface comme pour les eaux souterraines, par une pollution liée à la dissémination des intrants agricoles que sont les produits phytosanitaires, les engrais minéraux azotés et phosphatés ou encore les effluents d'élevage. Lorsque ces produits sont épandus en quantité supérieure aux besoins des plantes, les excédents sont entraînés par les pluies dans le sol ou ruissellent directement vers les cours d'eau. Une fois dans l'eau, les nitrates et les phosphates peuvent favoriser l'eutrophisation en stimulant la multiplication d'algues et de végétaux aquatiques. L'eutrophisation est un phénomène qui épuise les réserves d'oxygène dans l'eau, allant parfois jusqu'à faire suffoquer les animaux aquatiques.

L'utilisation de pesticides est susceptible d'entraîner une toxicité importante même à faible dose pour la faune, la flore et les usages de l'eau. Certains pesticides sont à l'origine de dommages pour l'environnement en raison de leur toxicité et/ou de leur persistance dans les milieux aquatiques et les êtres vivants (DDT, lindane par exemple). En effet, ces molécules peuvent perdurer pendant des années dans l'environnement. Quand elles sont partiellement biodégradables par les bactéries de l'environnement, elles peuvent générer des métabolites dérivés plus toxiques. Par ailleurs lorsque ces substances se retrouvent dans le cours d'eau à des concentrations supérieures à un seuil critique, elles peuvent freiner le processus d'auto-épuration. Ce qui favorise leur accumulation dans les eaux, intoxiquant les espèces vivantes qui les ingèrent. Il en résulte une accumulation au fil de la chaîne alimentaire.

Ces pollutions d'origine agricole sont souvent ignorées jusqu'à ce que leur présence soit détectée dans l'eau. La contamination des eaux superficielles et des nappes souterraines menace la qualité des eaux destinées à la consommation humaine qui ne doivent pas excéder un certain seuil de concentration : par exemple, pour les produits phytosanitaires, ce seuil est de 0,1 microgramme par litre (selon une directive européenne de 1989). Par voie de conséquence, il arrive de plus en plus fréquemment que des zones de captage d'eau potable soient interdites à la consommation humaine du fait de telles pollutions.

Au regard de toutes ces nuisances causées par les intrants agricoles, il s'avère nécessaire de mener une étude visant à comprendre les phénomènes de pollution des eaux (superficielles et souterraines) par ces derniers. Ainsi, le thème intitulé « la pollution agricole des eaux douces (Superficielles et souterraines)» trouve toute sa justification. L'objectif général de cette étude est de chercher des informations sur de telles pollutions afin que les acteurs de développement puissent voir dans quelles mesures ils vont emmener les agriculteurs à adopter une meilleure gestion des intrants agricoles notamment pour préserver les ressources en eau, qu'elles soient superficielles ou souterraines.

Les objectifs spécifiques sont :

- Comprendre les mécanismes de pollution des eaux (superficielles et souterraines) par les intrants agricoles
- Faire une étude de leur impact sur la qualité de ces eaux
- Faire un état des lieux à travers des études de cas

Le présent rapport fait l'objet d'une synthèse bibliographique et s'articule autour des points suivants :

- Une première partie consacrée à une étude bibliographique sur les généralités sur la pollution des eaux (superficielles et souterraines). Ainsi, après avoir identifié les différents types de pollution et de polluants spécifiques, nous nous concentrerons sur la pollution agricole dont il est question dans cette étude. A ce niveau nous faisons une étude sur les mécanismes de transfert des intrants agricoles vers les eaux superficielles et souterraines et leurs devenir possibles dans ces eaux. Cette même partie bibliographique propose ensuite d'aborder l'étude de l'impact de ces intrants sur les eaux,

- Une deuxième partie qui s'intéresse à l'étude des cas : cas de la contamination de l'eau souterraine par les pesticides en Côte d'Ivoire, et celui de la pollution de deux réservoirs d'eau (Loumbila et Mogtédou) par les intrants agricoles (engrais et pesticides) au Burkina Faso.
- La formulation d'un certain nombre de perspectives vis-à-vis de la pollution ainsi étudiée,
- Et enfin la conclusion générale.

Méthodologie

Le travail a commencé par une recherche documentaire au niveau de la bibliothèque du 2iE où certains documents concernant le thème ont été consultés. La recherche s'est ensuite poursuivie à l'Université de Ouagadougou particulièrement au niveau du CEPAPE.

La recherche documentaire a également fait l'objet de la consultation de certains sites sur internet où nous avons pu collecter la majorité des informations relatives au thème d'étude. Néanmoins nous étions confrontés à un problème de données.

I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Généralités sur la pollution des eaux

I.1.1 Définitions

La pollution se définit comme la dégradation d'un milieu naturel par introduction d'un polluant. Cette notion de dégradation est très importante, puisqu'en l'absence de conséquences négatives pour le milieu, on ne peut pas parler de pollution. Pour une même substance, son caractère polluant sera plus ou moins élevé en fonction des quantités déversées dans le milieu et de la capacité de ce milieu à l'éliminer naturellement [R2].

La pollution de l'eau est une altération qui rend son utilisation dangereuse et (ou) perturbe l'écosystème aquatique. Elle peut concerner les eaux superficielles (rivières, plans d'eau) et/ou les eaux souterraines [R3].

Le polluant se définit comme un altéragène biologique, physique ou chimique, qui au delà d'un certain seuil, et parfois dans certaines conditions (potentialisation), développe des impacts négatifs sur tout ou partie d'un écosystème ou de l'environnement en général [R4].

La notion de pollution appelle donc celle de contamination d'un ou plusieurs compartiments des écosystèmes (air, eau, sol), d'un organisme (qui peut être l'Homme) ou d'un groupe d'organismes, ou ayant une incidence sur l'écosystème, au delà d'un seuil ou norme. La contamination peut notamment s'étendre ou se modifier via le réseau trophique (chaîne alimentaire) (bioconcentration, bioturbation) [R5].

Pour l'utilisateur, l'eau est polluée quand sa qualité ne correspond plus aux exigences de certains usages. Dans ses usages (domestiques, agricoles ou industriels) l'eau remplit de multiples fonctions. On peut distinguer, sans être exhaustif, l'eau pour la boisson, pour l'hygiène, pour l'irrigation, pour l'agro-alimentaire, pour l'énergie, pour le transport, pour les loisirs, etc... La définition de "classes de qualité" de l'eau permet de répondre aux exigences d'utilisation de l'eau comme par exemple les "critères" ou "normes" de potabilité [R6].

En d'autres termes, un milieu aquatique est dit pollué, lorsque son équilibre a été modifié de façon durable par l'apport en quantités trop importantes soit de substances plus ou moins toxiques, d'origines naturelles ou issues d'activités humaines, soit encore d'eaux trop chaudes. Ces pollutions peuvent entraîner divers types de nuisances : augmenter la mortalité de certaines espèces animales ou végétales jusqu'à parfois les faire disparaître, altérer leurs capacités physiologiques, détériorer la qualité de l'eau au point de la rendre impropre à certains usages, comme l'alimentation humaine (Diallo, 2004).

I.1.2 Les Types de pollution

La pollution de l'eau est l'ensemble des nuisances auxquelles peut être exposé son usager. La pollution engendrée peut être d'ordre physique (radioactivité, élévation de la température...), chimique (rejets agricoles, industriels et urbains) et microbiologique (rejets urbains, élevage...). Pour mieux évaluer la pollution, il existe des paramètres qui permettent d'estimer l'ampleur de celle-ci en fonction de son type.

I.1.2.1 La pollution chimique

La pollution chimique est due à l'entrée d'un élément (ou plusieurs) indésirable dans la composition chimique de l'eau initialement destinée à un usage bien précis. Deux types de paramètres permettent d'évaluer l'état de cette pollution :

- ✓ Les paramètres globaux : ils résultent de la juxtaposition des effets de plusieurs substances en même temps, exemple : pH, conductivité, turbidité, Demande Chimique en Oxygène (DCO), etc... La DCO d'une eau représente l'ensemble de toutes les espèces chimiques oxydables, organiques et minérales, dissoutes ou en suspension ;
- ✓ Les paramètres spécifiques qui caractérisent un composé particulier ou plusieurs de propriétés chimiques semblables.

I.1.2.2 La pollution physique

La pollution physique est liée aux facteurs influents sur l'état physique de l'eau tels que la température, la présence des particules ou mousses et le changement de l'effet réfractaire de l'eau. Le rejet d'eau chaude des centrales nucléaires dans les cours d'eau constitue la préoccupation de nombreux pays.

I.1.2.3 La pollution microbiologique

La pollution microbiologique résulte de la présence dans l'eau de microorganismes qui sont véhiculés par l'eau et sont responsables de beaucoup de maladies hydriques (Belhaj, 2001). L'eau peut être un milieu favorable aux développements des bactéries et virus nuisibles à la santé humaine des populations qui l'utilisent pour leurs besoins. Les bactéries pathogènes (*Vibrionacea*, *Enterobacteriaceae*, etc...) sont responsables des principales maladies hydriques. Les parasites sont eux aussi la cause de plusieurs autres maladies (hépatite infectieuse, méningite, ect.).

Le tableau 1 nous donne l'origine des polluants du milieu aquatique

Tableau 1: Origines et natures des différentes sources de pollution du milieu aquatique
(Source : les dossiers scientifiques du CNRS : Eau) dans (Céline, 2004)

Types de pollution	Nature	Origines
Physique	Rejet d'eau chaude	Centrales thermiques, nucléaires
	MES	Rejets urbains, érosion des sols
Chimique	Matières organiques	Effluents domestiques, agricoles, agroalimentaires
	Fertilisants (nitrates, phosphates)	Agriculture, lessives
	Métaux (Cd, Pb, Hg, Al, As...)	Industrie, agriculture, déchets
	Pesticides (insecticides, herbicides, fongicides)	Industrie, agriculture
	Organochlorés (PCB, solvants)	Industries
	Composés organiques de synthèse	Industries
	Détergents	Effluents domestiques
	Hydrocarbures	Industrie pétrolière, transports
Biologique	Bactéries, virus, champignons	Effluents urbains, agricoles

Le déversement dans le milieu aquatique de substances ou d'effluents contaminés n'est pas la seule cause de pollution des eaux de surface ou souterraines. En effet, l'eau des pluies permet aux polluants rejetés dans l'atmosphère de retomber sur les sols et lessive les zones polluées. Par ruissellement et/ou par infiltration, ces xénobiotiques peuvent alors rejoindre le milieu aquatique. De très nombreuses molécules sont donc susceptibles de polluer les écosystèmes aquatiques.

I.1.3 Mode de pollution

Les contaminations des eaux (superficielles et souterraines) peuvent être classées en quatre types de pollutions liés aux modes de propagation : les pollutions accidentelles, les pollutions diffuses, les pollutions naturelles et les pollutions anthropiques.

I.1.3.1 Les pollutions accidentelles

Le plus souvent les pollutions ponctuelles se trouvent liées aux grandes activités industrielles ou agricoles. Elles peuvent aussi résulter d'un accident de transport ou d'une catastrophe naturelle sur des usines ou stockages des produits qui vont engendrer cette pollution. Selon (Calamari, 1985), les déversements accidentels de pétrole enregistrés entre 1976 et 1980 au Nigeria, s'élèvent à 784 tonnes pour une quantité estimée à 293 020 tonnes de pétrole. Ces

déversements ont pour conséquences la contamination et l'intoxication de la vie aquatique des milieux concernés notamment dans le delta du Nigeria et la pollution des eaux souterraines.

I.1.3.2 Les pollutions diffuses

Elles résultent de la propagation de l'agent responsable de la pollution par différents vecteurs de transport, qu'il soit utilisé de façon habituelle pour des usages courants ou non. Le lessivage des pesticides du sol et le transport des matières actives par le vent dans les zones parfois même inaccessibles en sont des exemples concrets et très inquiétants (présence de la pollution de certains pesticides au pôle Nord) (Céline, 2004)

I.1.3.3 La pollution naturelle

On entend par pollution d'origine naturelle toute pollution modifiant de manière indésirable les différentes propriétés de l'eau, ceci de façon naturelle et non pas humaine [R7]. Elle peut être due à certains phénomènes naturels tels que : les éruptions volcaniques, les épanchements sous-marins d'hydrocarbure...ou encore lorsque l'eau entre en contact avec des gisements minéraux et par un effet d'érosion ou de dissolution, cela engendre des concentrations inhabituelles en métaux lourds, en arsenic etc.

I.1.3.4 La pollution anthropique

En rejetant des effluents contaminés dans le milieu aquatique, les activités humaines industrielles, agricoles domestiques ou urbaines polluent les eaux.

✓ **La pollution urbaine :** Les pollutions urbaines proviennent des différents usages domestiques et collectifs de l'eau et des déchets La pollution urbaine est généralement de nature organique et dépend pour beaucoup de l'étendue des villes, de l'existence de stations d'épuration, des effluents, et des habitudes des habitants en matière d'élimination des déchets [R7]. L'eau chargée de convoyer ces déchets est qualifiée d'eau usée.

Au cours d'événements pluvieux, les eaux usées urbaines migrent par ruissellement et/ou par infiltration vers les eaux (superficielles et souterraines).

Baudu (1995) soulignait que les rejets urbains par temps de pluie sont susceptibles de modifier considérablement les conditions hydro biologiques du milieu récepteur selon deux mécanismes :

- impact volumique dû aux apports importants en milieu urbain et à la rapidité de ces apports ;

- impact qualitatif par pollution massive et subite du milieu récepteur : apport d'une charge importante, dégradation bactériologique du milieu et introduction de micro polluants (fraction pluviale).

Un exemple de pollution urbaine préoccupante est celui du fleuve Niger. En effet, la présence au bord de ce fleuve d'importantes villes comme Bamako, Koulikoro, Ségou, Mopti, Gao et Tombouctou au Mali et Niamey au Niger expose ce dernier à une pollution urbaine due aux rejets des eaux usées urbaines qu'elles produisent.

Au Mali, les nappes superficielles des eaux souterraines sont polluées à partir des infiltrations provenant essentiellement des eaux usées domestiques (surtout au niveau des vieux quartiers des centres urbains comme Bamako où on enregistre plus de 150 mg/l de NO_3^- , 100 mg/l de Cl^- dans l'eau des puits) [R8].

- ✓ **La pollution industrielle :** L'industrie joue un rôle sur la qualité des eaux du fait des prélèvements d'eau et des rejets aqueux [R9]. En effet, Les rejets industriels de plus en plus importants, constituent un danger croissant pour le milieu aquatique. Ils provoquent des altérations de ce milieu à cause de leurs charges en matières organiques, matières en suspension, azote, phosphore et substances dissoutes souvent toxiques.

Dans les pays en développement, 70% des déchets industriels sont rejetés sans traitement dans les cours d'eau et polluent l'eau utile à l'approvisionnement [R9]. Selon Bassirou, 2007 les rejets liquides industriels déversés vers le fleuve Niger sont estimés à environ 2 500 m³ j⁻¹ au Mali et au Niger.

- ✓ **La pollution agricole :** L'agriculture constitue l'une des principales sources diffuses de pollution des eaux (superficielles et souterraines). On entend par sources diffuses, celles qui se caractérisent par des apports de substances émises par des sources mobiles, des sources couvrant de larges étendues ou un grand nombre de sources de pollution d'émission faible [R10]. En d'autres termes, les pollutions diffuses sont les pollutions dont la ou les origines sont généralement connues mais pour lesquelles il est impossible de repérer géographiquement des rejets dans les milieux aquatiques et les eaux souterraines [R11].

Les pollutions agricoles sont dues à deux facteurs principaux : les produits chimiques, engrais, produits phytosanitaires ou pesticides (fongicides, herbicides, insecticides) et l'élevage avec les excréments, fumiers, lisiers...

I.1.4 Les polluants d'origine agricole :

I.1.4.1 Les pesticides ou produits phytosanitaires : Définitions et fonctions

✓ **Définition** : Le pesticide vient du mot anglais Pest qui signifie animal ou plante nuisible à la culture. Les pesticides ou produits phytosanitaires sont l'ensemble de substances chimiques, qui par leur effet peuvent détruire de façon totale ou partielle des espèces du milieu naturel.

Ces substances chimiques sont diverses :

- minérales comme le soufre, le sulfate de cuivre;
- organiques naturelles comme la pyrèthrine ;
- organiques de synthèses comme les organochlorés (pesticides très stables chimiquement), les organophosphorés, les organométalliques, les triazines, les dérivées de l'urée, les carbamates, ect.

Ces produits peuvent être classés en trois grandes familles selon la nature de l'espèce nuisible : les fongicides, les herbicides et les insecticides (Figure 1). À celles-ci s'ajoutent les acaricides (contre les acariens), les nématicides (contre les nématodes), les rodenticides (contre les rongeurs), les taupicides (contre les taupes), les molluscicides (contre les limaces et les escargots essentiellement), les corvicides et les corvifuges (contre les oiseaux et surtout les corbeaux) et enfin les répulsifs (Mari, 2004). Ces pesticides (insecticides, raticides, fongicides et herbicides) sont des composés chimiques dotés de propriétés toxicologiques, utilisés par les agriculteurs pour lutter contre les animaux (insectes, rongeurs) ou les plantes et les champignons jugés nuisibles aux plantations.

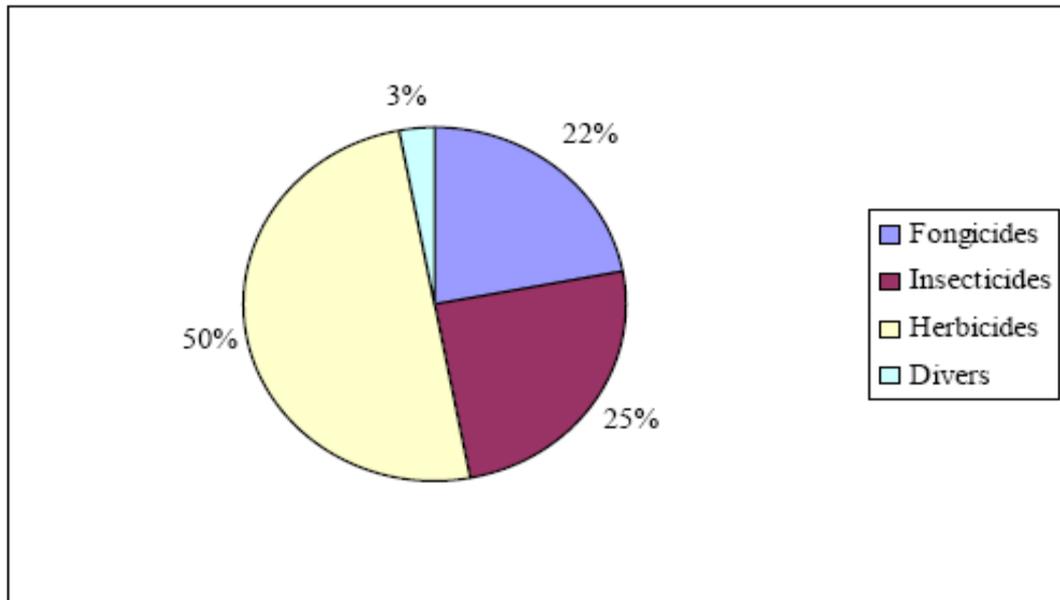


Figure 1: La répartition mondiale des produits phytosanitaires par catégorie de produits en 2002 (Mari, 2004).

✓ **Fonctions** : Les produits phytosanitaires ont une fonction exogène à la croissance des plantes qui permettent d'atteindre des rendements potentiels (Mestres, 1997). En agriculture, ces produits permettent de réduire très significativement les risques culturaux : éradication d'insectes ravageurs, lutte contre les champignons donnant des maladies aux végétaux, élimination des adventices qui concurrencent les plantes cultivées, traitement des denrées afin d'en préserver la qualité pendant le stockage et le transport. Les fonctions des différentes familles de pesticides peuvent être décrites comme suit :

- Les herbicides sont les pesticides les plus utilisés dans le monde toutes cultures confondues (50 % du tonnage mondial en 2002) (Mari, 2004). Ils servent à détruire les mauvaises herbes adventices des cultures. Ils contribuent ainsi à l'augmentation des rendements agricoles.
- Les insecticides sont destinés à détruire les insectes pouvant nuire à la croissance des cultures ou à la qualité de la production. Beaucoup d'insecticides ont la propriété d'être toxiques par contact, c'est-à-dire de provoquer un empoisonnement rapide des insectes, car ils traversent très facilement leur tégument cuticulaire.
- Les fongicides servent à combattre la prolifération des champignons phytopathogènes. Ils permettent de lutter contre les maladies cryptogamiques qui causent de graves dommages aux végétaux cultivés. Ils sont tous à l'origine des produits actifs par contact.

Ils agissent sur les spores au début de leur germination avant que les filaments des champignons aient pu pénétrés dans les tissus de la plante (Inades, 2001).

Le tableau 2 présente les trois grandes familles de pesticides et leurs groupes chimiques.

**Tableau 2: Quelques grandes familles de pesticides
(Source : les dossiers scientifiques du CNRS : Eau) dans (Céline, 2004)**

Familles	Groupes chimiques
Herbicides	S-triazine (atrazines...)
	Herbicides phénoxy
	Phénulurées (diuron, isopropuron...)
	Bipyridules (paraquet...)
	Dinitroanilines (trifluraline...)
	Sulfonylurées (triasulfuron...) et imidazolinones (imazapyr...)
Insecticides	Organophosphorés (parathion, malathion...)
	Carbamates (carbaryl, carbofuran...)
	Organochlorés (DDT...)
Fongicides	Pyréthroïdes (cyperméthrine, deltaméthrine...)
	Triazoles (triadimefone...), imazadoles(bénomyl, carbendazine...)
	Strobilurines (azoxystrobine...)

I.1.4.1.1 Devenir des pesticides dans l'environnement :

Selon (Pimentel, 1995) moins de 0,3% des produits phytosanitaires appliqués sur les surfaces agricoles entrent en contact avec les organismes indésirables cibles. La quasi-totalité du produit restant se disperse dans les trois compartiments de l'environnement (l'air, le sol et l'eau) où, en se dégradant, il peut donner de nouvelles molécules plus ou moins toxiques. Les mécanismes qui gouvernent ce devenir peuvent être classés en trois types : dégradation, rétention et transfert.

Par ailleurs, l'interdiction d'employer certaines molécules (par exemple l'interdiction en France de l'emploi de DDT en 1972 ; atrazine en 2003, Fipronif en 2004) ne signifie pas leur disparition totale du milieu. Le devenir et la persistance des pesticides dans l'environnement sont donc des enjeux écologiques d'importance.

➤ **Dégradation**

Dès leur application, les pesticides subissent des processus biotiques et abiotiques qui amènent à leur dégradation plus ou moins complète. Ces mécanismes ont lieu dans l'eau, l'air, le sol et les sédiments même si le plus grand nombre d'étude concerne le compartiment sol (Belamie et al, 1997).

- **La dégradation biotique** résulte de l'action des microorganismes contenus dans le sol. La grande partie des pesticides est dégradée au niveau du sol par voie microbienne. Le sol offre de grandes potentialités en matière de diversité génotypiques et phénotypiques des populations microbiennes capables de dégrader des molécules xénobiotiques (Céline, 2004). La dégradation d'une molécule peut résulter de l'action, à des moments différents, de plusieurs souches microbiennes (Mallick et al.; 1999). Par exemple, la dégradation du 3,4-dichloropropionanilide en 3,4 dichloroaniline sur les sols est attribuée aux microorganismes du sol selon Tixier et al.,(2000). La dégradation des produits phytosanitaires peut s'effectuer également au niveau des plantes. En effet, à l'intérieur de la plante les produits phytosanitaires peuvent être dégradés sous l'action d'enzymes ou de réactions simples. Cependant la persistance de certaines molécules dans des plantes peut être observée, en effet Francisco et al., (1999) soulignaient la persistance du méthylparathion et parathion dans des plantes. Les conditions du sol (pH, température, ensoleillement, aération et humidité) peuvent influencer les mécanismes de biodégradation des pesticides. La même dégradation peut se produire dans l'eau sous l'action des organismes qui y vivent.
- **La dégradation abiotique** s'effectue sur le sol sous l'effet des rayons solaires (réactions photochimiques ou photodécomposition) ou dans le sol par des réactions chimiques (hydrolyse).
 - ✓ La photo décomposition se produit sous l'effet des rayons ultraviolets de longueurs d'ondes comprises entre 100 et 450 nm entre le visible et les rayons X (Céline, 2004). Les résultats de ces réactions sont le plus souvent une oxydation de la molécule. Ce processus peut avoir lieu dans l'atmosphère, dans l'eau, à la surface du sol et des plantes (Marcheterre et al., 1988).
 - ✓ L'hydrolyse constitue une des voix de dégradation des pesticides en phase aqueuse au niveau des constituants du sol. Elle concerne la transformation du pesticide (composé

soluble dans l'eau) sous l'influence de l'eau. L'hydrolyse est conditionnée par les conditions redox du milieu (Céletine, 2004).

➤ **Rétention**

La rétention d'un composé est le passage de la phase liquide ou gazeuse vers la phase solide imputable à des phénomènes réversibles appelés sorptions ou irréversibles (Belamie et al, 1997). Par sorption sont désignés les mécanismes d'adsorption, d'absorption et de précipitation difficilement identifiables séparément (Koskinen, Harper, 1990). L'adsorption est le mécanisme le plus décrit dans la bibliographie (Colin, 2000).

L'adsorption des produits phytosanitaires constitue un mécanisme important dans la rétention d'une quantité plus ou moins significative des produits. L'adsorption représente le phénomène majeur d'immobilisation des composés dans le sol, il se réalise par la fixation d'un certain nombre de molécules ou d'ions sur des composés insolubles. Le phénomène d'adsorption se réalise entre les produits phytosanitaires et les constituants du sol, tels que la matière organique dissoute ou solide, les colloïdes, les argiles.

❖ **Transfert**

Le transfert constitue l'un des processus qui intervient dans la dispersion des produits phytosanitaires dans l'environnement. Il se produit sous l'effet de la pluie (ruissellement, infiltration et transfert vers les nappes et cours d'eau) mais également par l'élévation de température ou le vent qui favorisent la volatilisation des substances ou la dispersion au cours du traitement.

Les quantités transférées dépendent des conditions météorologiques pendant et après la période de traitement, des caractéristiques du sol (humidité, pente, perméabilité, teneur en matières organiques, porosité, activité biologique), de la formulation du pesticide ainsi que des caractéristiques physico-chimiques propres à chaque molécule [R3].

La volatilisation traduit le départ des produits phytosanitaires dans l'atmosphère. Ce transfert vers l'atmosphère se fait par dérive (entraînement par le vent) lors de l'épandage ou par évaporation. Le transfert par dérive est influencé par les conditions climatiques lors de l'épandage, la formulation chimique du produit, les techniques et matériels d'application, les conditions les plus défavorables par aéronef pouvant engendrer des pertes de plus de 50% (Van Der Werf, 1996). L'évaporation concerne les molécules phytosanitaires déposées à la surface du sol et des plantes. Les pertes par évaporation sont plus importantes sur un sol sec que celles engendrées sur le même sol humide. Par exemple d'après Jury et al., (1984), Les

pertes de la trifluraline sur un sol sec sont de 50% alors qu'elles sont simplement de quelques pour cents sur le même sol humide. Selon (Taylor, Spencer, 1990), les pertes par volatilisation peuvent atteindre des proportions très élevées, jusqu'à 80 à 90%.

I.1.4.1.2 La Pollution des eaux par les produits phytosanitaires appliqués sur les cultures :

L'agriculture actuelle est basée sur l'utilisation d'intrants pour s'affranchir des facteurs limitants. Le recours aux produits phytosanitaires permet ainsi d'optimiser les rendements et d'assurer une production viable. Toutefois, l'utilisation des produits phytosanitaires de façon systématique provoque une dégradation de la ressource en eau par un phénomène de pollution diffuse.

❖ Transfert des produits phytosanitaires vers les eaux (superficielles et souterraines)

Le **vent** et la **pluie** sont les principaux vecteurs responsables des transferts de produits phytosanitaires vers les nappes et les rivières.

✓ **Transferts liés au vent :** Les pertes en produits phytosanitaires lors de l'épandage varient de 5 à 30% (Cellier, 1999). Cet entraînement par le vent est dû à la dérive des embruns de pulvérisation. Ce phénomène est lié au vent soufflant lors de l'application ainsi qu'à la part de gouttelettes d'une taille inférieure à 100µm qui sont susceptibles d'être transportées sur de très longues distances [R15]. Ces gouttelettes peuvent également s'évaporer ou être transportées sous forme particulaire. Elles finissent par se déposer par voie sèche ou par lessivage par les pluies. Cet entraînement par le vent constitue également une voie de transfert très rapide à courte distance, notamment vers les cours d'eau ou fossés bordant les zones agricoles. La figure 2 nous montre un exemple de perte de produits phytosanitaires lors de l'épandage.

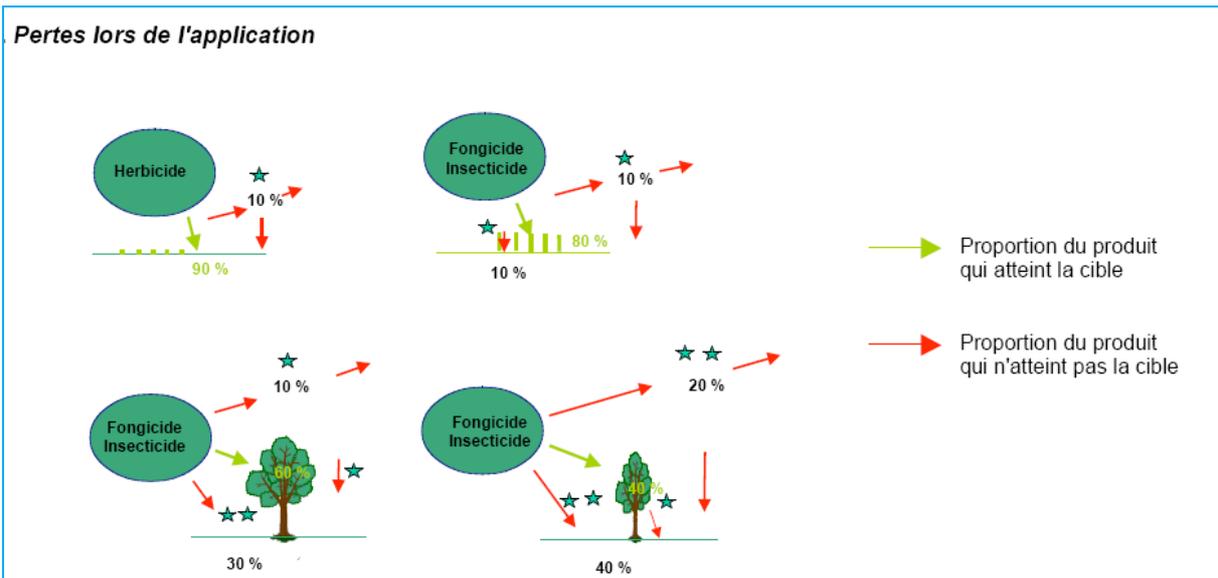


Figure 2: Pertes de produits phytosanitaires lors de l'application [R13]

✓ **Transferts liés aux précipitations :** La dérive de pulvérisation mis à part, l'eau est un des vecteurs principaux de transfert des substances appliquées sur les parcelles vers les milieux aquatiques. En effet, si le principe de la dose juste au bon moment n'est pas respecté, et si les sols n'ont pas une capacité de rétention suffisante, il est admis que les produits phytosanitaires ont une grande probabilité d'être entraînés par les eaux pluviales vers les cours d'eau et les nappes d'eau souterraine. Ces transferts sont favorisés par la haute solubilité des pesticides et s'expliquent par:

- le ruissellement de surface et l'érosion,
- le ruissellement hypodermique ou écoulement de subsurface (sous la surface du sol) et les réseaux de drainage agricole,
- l'infiltration en profondeur (lixiviation).

▪ **Transfert par le ruissellement de surface et l'érosion :** Le ruissellement de surface est lié à l'état du sol. Il peut avoir pour origine des pluies sur un sol déjà saturé en eau (cas des pluies hivernales), la formation d'une croûte de battance imperméable, un sous-sol imperméable qui bloque l'infiltration, une intensité de pluie supérieure à la capacité d'absorption du sol (pluies orageuses estivales).

A la suite d'événements pluvieux, une partie des eaux de pluie s'écoule à la surface du sol et peut entraîner des particules et des produits (en particulier les produits phytosanitaires) vers les milieux aquatiques.

Wauchope (1991) rapporte que les pertes de produits phytosanitaires par ruissellement représentent environ 0,5 % de la quantité appliquée pour la majorité des produits commercialisés (composés solubles dans l'eau, appliqués en solution aqueuse et incorporés dans le sol). Cependant, pour les composés insolubles et donc appliqués sous forme d'émulsion (ex : pesticides persistants à application foliaire), ces pertes peuvent représenter jusqu'à 1 % de la quantité appliquée (Bertrand, 2004).

Dans le cas des herbicides appliqués sous forme de poudre mouillable facilement lessivable, les pertes peuvent atteindre 5 % de la quantité appliquée, suivant la pente du terrain et les conditions climatiques (Bertrand, 2004). Le mode d'application et le type de formulation utilisés influencent donc, de façon non négligeable, le transfert des produits phytosanitaires par ruissellement.

Lorsque des précipitations importantes surviennent peu de temps après les traitements, les pertes par ruissellement peuvent représenter 8 à 11 % des quantités apportées (Bertrand, 2004). Tous les événements pluvieux ne possèdent donc pas le même potentiel de transfert des produits phytosanitaires utilisés en agriculture. (Gril et al. 1995) considèrent que, même si les quantités transportées sont infimes par rapport à celles appliquées, le ruissellement constitue la principale forme de contamination des eaux superficielles et, indirectement, des eaux souterraines par alimentation des aquifères.

L'érosion liée au ruissellement participe également aux transferts des pesticides vers les eaux en entraînant les particules de sol sur lesquelles se sont fixées les molécules phytosanitaires.

▪ **Transfert par le ruissellement hypodermique et les réseaux de drainage agricole :**

Le ruissellement hypodermique est la circulation latérale de l'eau sous la surface du sol. Il est lié à la présence de ruptures de perméabilité (semelle de labour, sous-sol imperméable). La présence de réseaux de drainage agricole accentue la quantité de produits phytosanitaires susceptibles d'atteindre les milieux aquatiques en favorisant une circulation rapide de l'eau, ce qui soustrait les molécules phytosanitaires à l'action de dégradation des micro-organismes du sol. [R14]

▪ **Transfert par l'infiltration en profondeur :** Il s'agit de l'entraînement en profondeur des eaux, provoquant le transfert des pesticides dans les eaux souterraines. Ce transfert des produits phytosanitaires vers les eaux souterraines ou lixiviation, concerne les molécules qui sont en solution dans la phase aqueuse du sol ou qui sont adsorbées sur les particules solides véhiculées par un flux d'eau vertical. Ces transferts de solutés

varient en fonction des caractéristiques du produit phytosanitaire, des propriétés du sol, de la vitesse d'infiltration et de l'épaisseur de la zone non saturée (Van Der Werf 1996).

Il convient de noter que la présence de la végétation favorise l'infiltration des pesticides ; ainsi Souiller (2000) estimait que la perte des pesticides par infiltration pouvait atteindre jusqu'à 99% si la zone traitée était herbacée.

La mobilité et le transfert des produits phytosanitaires sont fonction de leurs propriétés chimiques intrinsèques (temps de demi-vie, solubilité dans l'eau, K_{ow} , K_d , K_H , K_{oc}).

La figure 3 illustre le parcours effectué par certains pesticides dans un environnement schématisé.

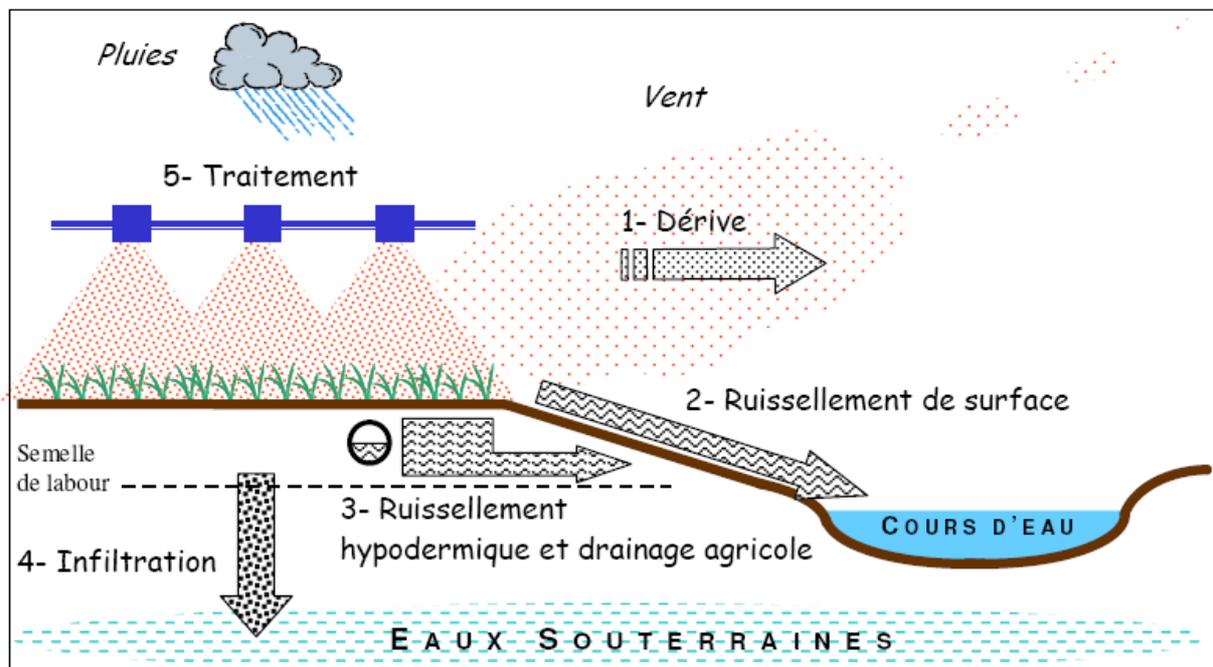


Figure 3: Voies de transfert des pesticides vers les eaux superficielles et souterraines [R15]

Notons que la contamination des eaux (superficielles et souterraines) n'est pas seulement due aux pesticides appliqués sur les parcelles agricoles. En effet, certains cas de contamination peuvent provenir des déversements de pesticides effectués dans l'environnement à partir des entrepôts. Ce type d'incidents peut survenir de différentes façons :

- les pesticides peuvent s'infiltrer dans le sol;
- ils peuvent être transportés par le vent;
- ils peuvent être dispersés par les eaux de ruissellement;

- ils peuvent être lixiviés dans les eaux souterraines et dispersés dans le sous-sol et s'introduire ensuite dans les cours d'eau ou les lacs.

Les principaux facteurs de risque d'un déversement sont :

- les caractéristiques des pesticides stockés; certains sont plus toxiques que d'autres, ou se dégradent rapidement sous forme de composés inoffensifs, alors que d'autres présentent une persistance plus élevée;
- la quantité de pesticides déversée et la durée du déversement.

On peut citer comme exemple de risque de pollution par les produits phytosanitaires l'existence dans le bassin du Niger d'importants stocks périmés (265 tonnes au Mali) et l'utilisation des produits hautement toxiques comme le Ciperméthrine dans la culture du coton au Tchad (Bassirou, 2007).

La figure suivante montre un exemple de diffusion de pesticide dans l'environnement à partir de l'entrepôt.

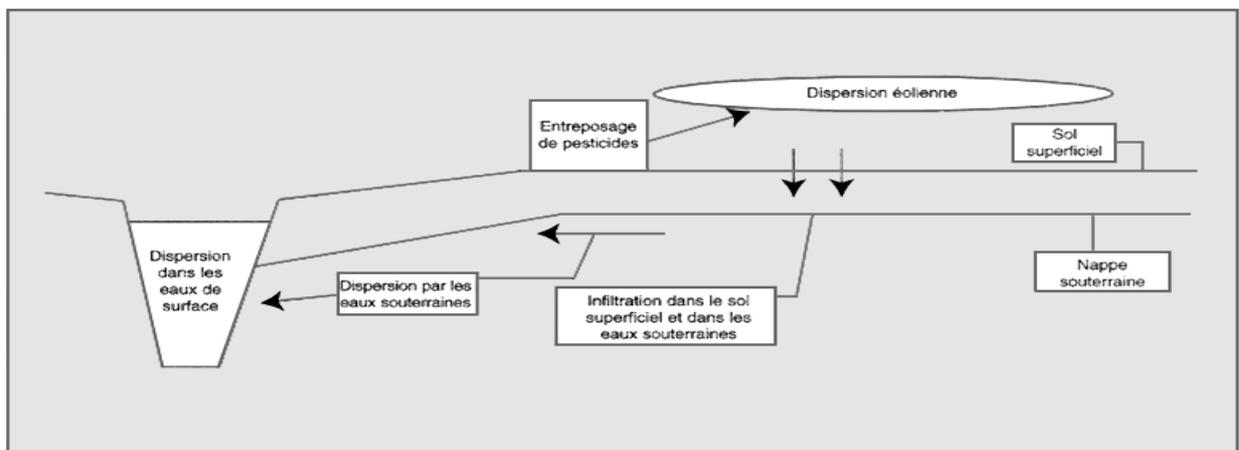


Figure 4: Diffusion des polluants dans l'environnement à partir d'un entrepôt (Carlier, 1998)

I.1.4.1.3 Effet des produits phytosanitaires sur les eaux (Superficielles et Souterraines)

L'impact direct de l'utilisation des produits phytosanitaires sur le milieu aquatique est la baisse de la qualité des eaux (superficielles et souterraines). La présence de concentrations trop élevées de pesticides (quantités supérieures aux seuils de potabilité) dans certaines ressources complique les processus de production de l'eau potable. La principale conséquence peut être une augmentation du prix de l'eau. En effet, le traitement de l'eau sera plus long et

des investissements importants devront être faits dans des techniques de pointe pour rendre l'eau potable.

Un cas de pollution par les produits phytosanitaires a été révélé au Mali où la pollution du fleuve Niger par le lindane et le diazinon a compromis pendant deux jours en 1993 l'utilisation de l'eau du robinet (Bassirou, 2007).

Une des principales caractéristiques qui influence les risques de contamination et d'impact des produits phytosanitaires sur le milieu est leur **persistance** plus ou moins longue dans un environnement donné.

Ces produits phytosanitaires pas ou peu biodégradables peuvent :

- altérer le goût, l'odeur et la couleur de l'eau. Ils peuvent rendre les poissons et les animaux moins fertiles, entraîner chez eux des malformations génétiques, endommager leur système immunitaire,
- causer directement la mort massive de poissons et d'autres organismes aquatiques, interrompant ainsi la chaîne alimentaire. (Pimentel et al., 1993) estiment qu'aux Etats Unis 6 à 14 millions de poissons sont morts chaque année à cause des pesticides entre 1977 et 1987. L'exposition à certains pesticides peut également engendrer des baisses de fertilité (Leblanc, 1995).
- freiner les processus d'autoépuration tels que la réoxygénation des eaux et la capacité de biodégradation par les microorganismes aérobies.
- se concentrer dans les organismes en bout de chaîne alimentaire, par bio-accumulation.

I.1.4.2 Les nutriments : définitions et fonctions

Les nutriments constituent les fertilisants que l'agriculteur apporte aux cultures en vue d'accroître la production. Ils regroupent les engrais et les effluents d'élevage.

- **Les engrais** sont des matières organiques qui mêlées à la terre arable lui fournissent les éléments nécessaires à la végétation en modifiant sa nature chimique et augmentent ainsi ou rétablissent sa fécondité [R20].

Les engrais sont des " matières fertilisantes dont la fonction principale est d'apporter aux plantes des éléments directement utiles à leur nutrition (éléments fertilisants majeurs, éléments fertilisants secondaires et oligo-éléments) " dont les éléments fertilisants majeurs sont:

- L'azote (N),
- Le phosphore (P) et,
- Le potassium (K).

Les engrais chimiques sont des intrants essentiels pour l'amélioration de la production agricole au double plan de la qualité et de la quantité. L'introduction des engrais permet, en effet, la réalisation d'un saut quantitatif et qualitatif dans l'alimentation agricole.

- **Les effluents d'élevage** : Ce sont les déjections des animaux d'élevage (fumiers, lisiers, ...) appelés aussi engrais de ferme. Ils participent à la nutrition des plantes et à la richesse des sols. Ils contiennent naturellement des éléments nutritifs (azote, phosphore, potassium)
- **Le fumier est un mélange** fermenté des litières pailleuses et des déjections des animaux. En élevage laitier, le fumier est surtout produit l'hiver.
- **Le lisier** : C'est le mélange liquide des urines et des excréments sans support de litières.

I.1.4.2.1 La pollution des eaux par les nutriments

La contamination de l'eau par les engrais et les effluents d'élevage est un des principaux problèmes liés aux activités agricoles. Cette contamination intervient quand l'apport de ces produits n'est pas complètement utilisé par les plantes. En effet, lorsque les quantités épandues dépassent les besoins des plantes, ou que la date d'apport ne coïncide pas avec les périodes où les plantes les utilisent, ils peuvent être entraînés par ruissellement de surface ou par lessivage (à travers le sol) vers les eaux (superficielles et souterraines). Notons que l'entraînement par ruissellement est très mineur par rapport au lessivage.

Parmi les éléments fertilisants, l'azote et le phosphore constituent les principaux polluants des eaux.

❖ La pollution azotée :

Issu principalement des épandages d'effluents d'élevage et des apports en engrais minéraux excessifs par rapport aux besoins des cultures, l'azote induit la formation des nitrates. Les nitrates sont des sels très solubles qui sont facilement entraînés en profondeur par les eaux d'infiltration. Ils descendent vers les nappes à des vitesses variables selon la nature du sol. On peut retenir 1 mètre par an sur terrain calcaire à titre indicatif. [R15]. Très soluble dans l'eau, les nitrates constituent aujourd'hui la cause majeure de pollution des grands réservoirs d'eau souterraine du globe qui par ailleurs présentent en général une qualité chimique et

bactériologique satisfaisante pour l'alimentation [R16]. Selon (Jolankai, 1992) l'accroissement de la concentration des nitrates dans les puits d'Europe est de l'ordre de 2 à 8 mg de nitrate NO_3^- par litre et par an. Les études menées par (ALHOU, 2000) au Niger montrent des teneurs en nitrates des eaux souterraines de l'ordre de 119 mg l⁻¹ en moyenne dans la communauté urbaine de Niamey. Selon (Bassirou, 2007) le flux de nitrates dans le fleuve Niger (moyenne étiage, saison des pluies, crue) s'élève à 51 t N j⁻¹.

La pollution par les nitrates peut avoir des raisons multiples :

- La tendance à surdoser pour s'assurer une marge de sécurité.
- La difficulté à évaluer les réserves du sol qui dépendent des apports précédents, du volume de matière organique enfouie, sous forme de racines et de chaumes, et dont la nitrification dépend largement des conditions climatiques.
- La recherche d'un rendement le plus élevé possible qui conduit à augmenter considérablement la fertilisation.
- La sur-fertilisation des récoltes pour l'intensification de l'activité agricole ;
- Les sols laissés à nu pendant la mauvaise saison et jusqu'au début du printemps

Notons que les nitrates existent dans les eaux à l'état naturel en absence de pollution. Leur concentration, alors, n'excède en général pas 3 mg/l à 5 mg/l dans les eaux superficielles et quelques mg/l dans les eaux souterraines [R17].

✓ **Transfert des nitrates vers les eaux (superficielles et souterraines):** Dans le système eau-sol-plante, les voies de transport préférentielles des nitrates sont le ruissellement de surface et l'infiltration (Jolankai, 1992).

➤ **Le ruissellement de surface** véhicule les nitrates vers des milieux aquatiques récepteurs. Les principaux facteurs dont dépend le phénomène sont:

- la pluie et son intensité (ainsi que la fonte du manteau neigeux)
- la pente du sol et la longueur des pentes, la distance au cours d'eau
- la couverture végétale
- les propriétés physicochimiques du sol
- la quantité de nitrate mobilisable à la surface ou près de la surface du sol

➤ **L'infiltration** : C'est l'entraînement en profondeur des eaux, provoquant le transfert des nitrates dans les eaux souterraines. Les eaux d'infiltration entraînent particulièrement les nitrates en profondeur, vers les nappes phréatiques. On parle de lessivage. Par leur mobilité, les nitrates peuvent être lessivés en quantités appréciables. Les pertes de nitrates par lessivage sont de 10 à 20 fois supérieures à celles produites par ruissellement [R18].

L'ampleur des pertes de nitrates est fonction de nombreux facteurs, dont la météorologie, le type de sol, la conductivité hydrique, les cultures en place, le mode de fertilisation et la nature des engrais [R19]. Selon (Comifer, 2002) les fuites de nitrate vers les eaux ont lieu principalement en période automnale et hivernale.

❖ **La pollution phosphorée**

Le phosphore est un élément principalement présent dans les horizons de surface des sols et dans la biomasse ; il est peu soluble. Il représente le facteur limitant de la production aquatique dans les eaux douces.

Comme dans le cas des nitrates, la pollution des eaux par le phosphore est due à un épandage excessif des engrais et des déjections animales dans une proportion supérieure à la capacité des sols et des cultures à les absorber. Les surplus migrent par ruissellement ou par lessivage des sols des champs vers les milieux aquatiques.

✓ **Transfert du phosphore vers les eaux (superficielles et souterraines)** : Selon (Lemercier, 2003), lorsque les engrais sont apportés sous une forme soluble dans l'eau, la part de phosphore prélevée par les cultures ne représente que 20 à 30% de cet apport au grand maximum, comme le montre la figure 5. Une partie du phosphore résiduel migre par ruissellement lors d'épisodes pluvieux vers les eaux de surface (ruisseaux, rivières et fleuves) tandis que l'autre partie est adsorbée dans les sols. En effet, les phosphates sont des composés très réactifs. Ils sont donc adsorbés très rapidement à la surface des particules colloïdales, et leur transfert dans le sol se fait donc presque exclusivement sous forme particulaire.

Les flux de phosphore se répartissent en :

- Un flux de ruissellement et érosion fortement dépendant des pratiques agricoles (ruissellement diffus) et, dans une moindre mesure, des teneurs en phosphore du sol (lors de conditions pluviométriques exceptionnelles) ;

- Un flux de drainage et lessivage dépendant de la saturation du sol en phosphore, peu dépendant à court terme des pratiques agricoles.

➤ **Ruissellement et érosion :** Le ruissellement intervient quand la pluviométrie est supérieure à la capacité d'infiltration du sol ou quand le sol est saturé en eau. Lors d'événement pluvieux, les eaux de ruissellement peuvent entraîner de particules du sol (et des éléments adsorbés comme le phosphore) vers les milieux aquatiques.

Selon (Lemercier, 2003) l'intensité des pluies, la nature et la structure du sol (sensibilité au compactage, à la battance), le travail du sol (présence de mottes à la surface, semelle de labour), la couverture du sol, la nature, la dose, la date d'épandage et le mode d'application des fertilisants phosphatés sont autant de facteurs qui jouent un grand rôle sur les transferts de phosphore du fait de leur importance dans la genèse du ruissellement.

L'érosion liée au ruissellement participe également aux transferts du phosphore vers les eaux en entraînant les particules de sol sur lesquelles s'est fixé le phosphore.

➤ **Drainage et lessivage**

- Le drainage consiste en l'évacuation en profondeur de l'excès d'eau en présence dans le sol. Il peut se faire naturellement par les voies de circulation préférentielles de l'eau dans le sol (macroporosité) ou être induit par la pose de canaux à ciel ouvert ou enterrés. Le ruissellement est assimilable à un drainage externe où l'élimination de l'eau se fait sur la surface du sol.
- Le lessivage se produit lorsque la quantité d'eau arrivée au sol devient supérieure à la capacité de rétention de ce sol. L'eau de pluie qui s'écoule dans le sol dissout les éléments nutritifs minéraux (dont le phosphore) et d'autres substances et les entraîne alors vers les eaux souterraines.

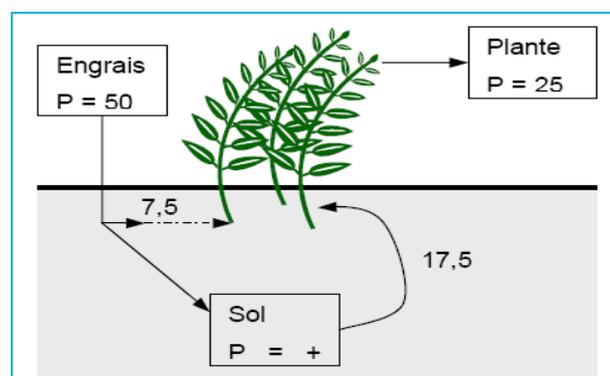


Figure 5: Evaluation du C.R.U. (Coefficient Réel d'Utilisation) du phosphore lors de l'apport d'engrais par la méthode isotopique (d'après les travaux de Fardeau) dans (Lemerancier, 2003).

A partir de cette figure on peut calculer le Coefficient Réel d'Utilisation du phosphore de l'engrais : $CRU = 7,5 / 50 \times 100 = 15\%$

I.1.4.2.2 Effets des nutriments (azote et phosphore) sur les eaux (superficielles et souterraines)

L'azote et le phosphore sont deux éléments essentiels au bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Toutefois, lorsqu'ils sont présents dans l'eau, en quantité excessive ils favorisent la prolifération d'algues et d'autres végétaux qui entraînent la dégradation des écosystèmes. C'est le processus d'eutrophisation.

L'eutrophisation : L'effet majeur des nitrates et des phosphates sur les eaux de surface est de les conduire à l'eutrophisation. Ce processus se déclenche quand les eaux sont trop chargées en ces deux nutriments qui permettent la croissance des algues. Quand ils sont tous les deux en grande quantité dans l'eau, les algues microscopiques (phytoplancton) et les végétaux fixés (macrophytes) se développent de façon excessive. La matière organique présente dans le cours d'eau augmente démesurément (la rivière devient parfois verte tellement les algues y pullulent), et quand les algues meurent, cette matière organique se décompose en consommant tout l'oxygène de la colonne d'eau, induisant ainsi l'anoxie, c'est-à-dire l'absence d'oxygène dans l'eau, et donc la mort de tous les poissons et invertébrés du milieu (Lavoie et al., 2007).

II. ETUDE DE CAS

II.1 CAS DE LA CONTAMINATION DE L'EAU SOUTERRAINE PAR LES PESTICIDES EN REGIONS AGRICOLES EN COTE D'IVOIRE (CENTRE, SUD ET SUD OUEST).

II.1.1 Introduction

La protection et la fertilisation des cultures amènent l'agriculteur à utiliser de nombreux produits dont les effets sur l'environnement ne sont pas sans conséquences, dès lors que des phénomènes de concentration apparaissent. Les terres agricoles reçoivent différents produits destinés à améliorer la nutrition des végétaux et les propriétés physicochimiques des sols. Non absorbés par les végétaux, lessivés par les pluies, bon nombre d'éléments se retrouvent dans les sols, l'atmosphère, les ressources en eau (superficielles et souterraines) voire l'homme à travers la chaîne alimentaire. Une fois dans les milieux aquatiques, ces substances indésirables dégradent leur qualité en diminuant d'autant leur capacité d'épuration, entraînant ainsi leur pollution. C'est d'ailleurs le cas en Côte d'Ivoire où l'utilisation abusive des intrants agricoles notamment les pesticides a entraîné la contamination des eaux souterraines par ces derniers, contamination détectée suite à des études effectuées en 2002 sur des puits situés en zone agricole (sites de maraîchage, plantations de café, de cacao, de banane et d'ananas) dans le centre, sud et sud-ouest du pays. En effet, en Côte d'Ivoire, la lutte chimique engagée pour protéger les cultures de café, cacao, hévéas, ananas, bananes a largement contribué à augmenter et à régulariser les rendements agricoles. Cependant, les produits agrochimiques sont incriminés dans la dégradation de la qualité des eaux tant superficielles que souterraines. Ainsi, des résidus d'insecticides, d'herbicides et de fongicides ont été décelés dans les retenues d'eau (barrages, lacs, lagunes) et même dans les aliments. La contamination des eaux de surface est la conséquence de la pollution des sols par les traitements phytosanitaires et des ruissellements des eaux à travers les zones traitées. L'infiltration de ces eaux vers la nappe phréatique constituait un sujet d'inquiétude. Surtout que les produits phytosanitaires sont suspectés d'avoir des effets secondaires indésirables pour l'homme et l'environnement. Pour évaluer l'état de contamination des eaux souterraines, une campagne d'échantillonnage des eaux de puits a été effectuée, du mois de mars au mois de juillet 2002, sur 11 sites agricoles. L'objectif de l'étude résidait dans l'identification des résidus de pesticides et leur impact sur la qualité des eaux.

II.1.2 Présentation des sites d'étude

Les études ont été menées sur onze sites repartis sur quatre zones (figure 6). Les sites 1 et 2 sont situés dans la zone de Buyo ; les sites 3, 4, 5 et 6 sont situés dans celle de Grand-lahou à

la lisière de l'embouchure du fleuve Bandama et le long de la lagune; les sites 7 et 8 sont situés en bordure des lacs artificiels de Yamoussokro ; enfin les sites 9, 10 et 11 sont situés dans les banlieues d'Abidjan (Azaguié, Anyama et Atingué).

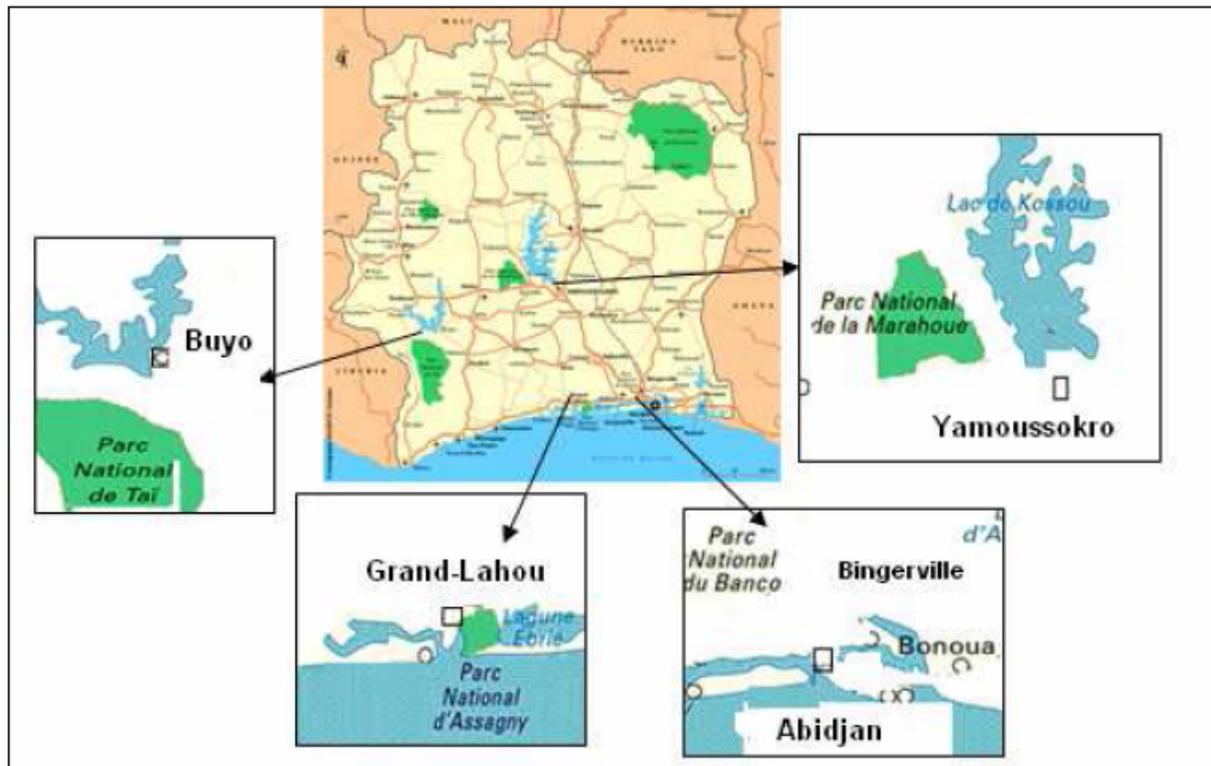


Figure 6: Localisation des zones d'échantillonnage (Traore et al. 2006)

II.1.3 Approche méthodologique (matériel et méthode)

L'étude a consisté à un échantillonnage. Ainsi, 89 puits domestiques situés à proximité des champs ont été choisis comme points d'échantillonnage de l'eau souterraine (tableau 3). La profondeur de ces puits varie de 1,5 à 5,6 mètres. La valeur médiane de cette profondeur est de 3,7 mètres. La distance entre les puits échantillonnés et les champs de café ou de cacao varie de 0,1 à 1 Km, mais, dans la plupart des cas, les champs sont à moins de 200 mètres des puits.

Dans le cas des plantations de bananes et d'ananas, les puits sont situés dans la majorité des cas au sein des plantations. Les 89 puits échantillonnés alimentent en eau « potable » environ 123 foyers.

Les analyses ont été portées sur la recherche des résidus des pesticides thermorésistants (comme les organochlorés) et thermolabiles (comme le profenofos).

II.1.4 Résultats et discussion

L'analyse des échantillons d'eau de puits révèle la contamination de la majorité des puits échantillonnés par les pesticides. En effet, dans les zones de Buyo, Grand Lahou, Yamoussokro et d'Anyama, 62 % (des puits situés près des plantations de café, cacao, bananes et ananas) et 90% (des puits situés près des cultures maraîchères) sont contaminés, soit 67% des 89 puits prospectés (tableau 5). Les résidus de pesticides détectés (20 au total) comprennent :

- les insecticides dont les principaux sont l'endosulfane, la dieldrine, le chlorpyriphos éthyl, le diméthoate et le lindane. D'autres insecticides, comme l'heptachlore, le diazinon, le malathion et le DDT et ses métabolites ont été également détectés.
- les herbicides détectés à l'état de traces comprennent principalement l'ametrine, le diuron et la simazine.
- les fongicides constitués du thiabendazole, du profenofos, du chlorothalonil et du carbendazime

Les concentrations moyennes des principaux résidus sont consignées dans la figure 7. Elles correspondent aux résidus dont les concentrations sont au-delà des normes ou des valeurs de référence recommandées pour l'eau potable, soient 0,1µg/L pour une matière active distincte, et 0,5µg/L pour le total des matières actives (OMS ,1994).

Les analyses révèlent la présence de L'endosulfane, le chlorpyriphos ethyl et l'Hexachlorocyclohexane (HCH) dans la majorité des échantillons.

Des résidus d'hexachlorocyclohexane (lindane) ont été détectés dans 80% des puits contaminés (soient 48 puits). Les concentrations moyennes par zone sont relativement du même ordre de grandeur (mis à part celle de Yamoussokro) (figure 7) ; elles restent en dessous de la norme (2 µg/L).

Des teneurs moyennes en β HCH, un des isomères du lindane, ont été décelées dans plusieurs échantillons de Buyo, elles sont inférieures à la limite de la norme (0,1µg/L) à l'exception de 15 % des puits de Buyo qui présentent des niveaux variant de 0,16 à 0,92 µg/L.

Tableau 3: Bilan de contamination des puits échantillonnés par zone (Traore et al. 2006)

Régions (zone)	Nombre de site par zone	Cultures pratiquées sur les sites et le nombre de puits échantillonnés 0	nombre de puits échantillonnés par zone	nombre de puits avec des résidus de pesticides
Buyo	2	Café (8), cacao (10)	18	13
Grand-Lahou	4	Palmeraie (5), Café (10), cacao (10), hévéas (5)	30	16
Yamoussokro	2	Maraîchage (9), café (4)	13	11
Abidjan	3	Maraîchage (9), bananes (10), ananas (9)	28	20
Total	11		89	60

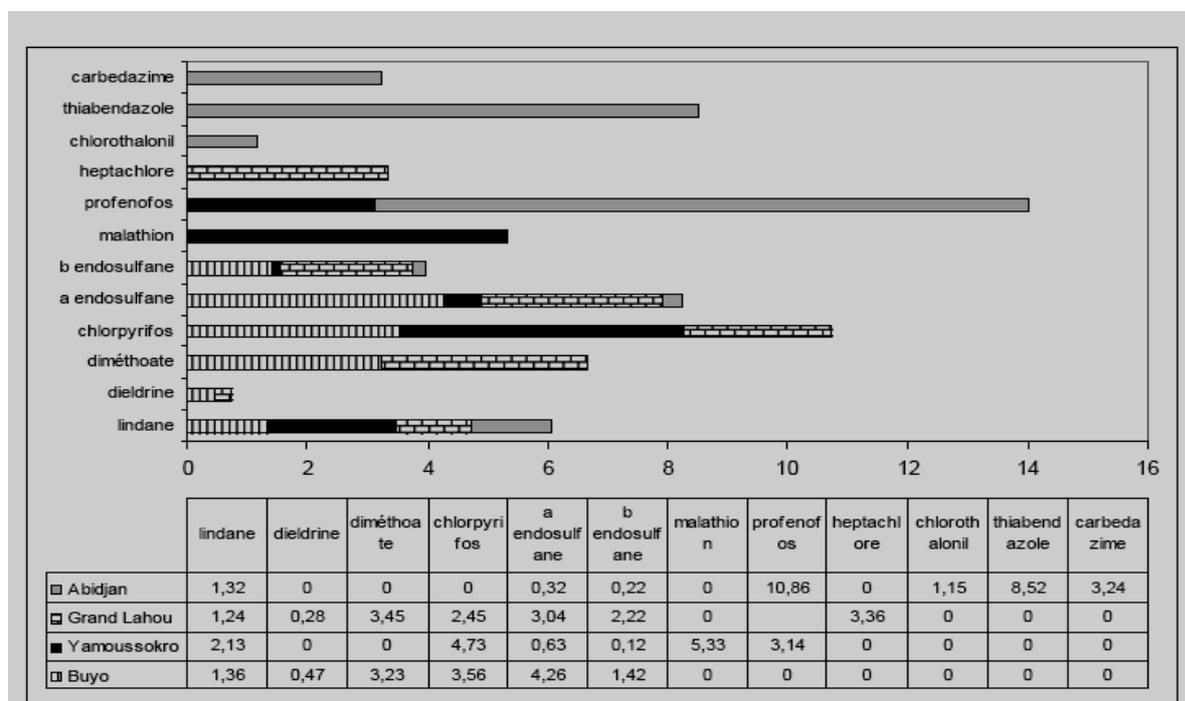


Figure 7: Concentrations moyennes (µg/L) des principaux pesticides identifiés dans les eaux des puits des zones de BUYO, Grand LAHOU, YAMOUSSOKRO et ABIDJAN (Traore et al. 2006)

Cette figure met en évidence une pollution importante par 12 molécules principales ayant une concentration supérieure à 0,1 µg/L et traduit leur présence relative dans les différentes zones.

Il s'agit de :

- L'endosulfane, qui a été détecté dans 85 % de l'ensemble des puits contaminés. Il se présente sous ses deux formes isomères : l'a endosulfane et le b endosulfane avec des concentrations maximales respectives de 25,28 µg/L et de 13,74µg/L. Les teneurs résiduelles moyennes de l'endosulfane détectées dans les eaux de l'ensemble des puits contaminés sont respectivement de 3,21µg/L pour l'a endosulfane et, 2,18 µg/L pour le b endosulfane. Il a été révélé que ces teneurs sont élevées dans la majorité des puits avec des valeurs moyennes en a endosulfane de 4,26 µg/L et en b endosulfane de 1,42 µg/L à Buyo, de 3,04 et de 2,22 µg/L dans les eaux des puits de Grandlahou. De tels résultats laissent présager d'une utilisation incontrôlée de ces produits. La persistance et la rémanence du produit ne peuvent expliquer à elles seules les valeurs rencontrées.
- Le chlorpyrifos éthyle, détecté dans 53 % des puits contaminés avec des valeurs maximales de concentrations (8,5µg/L, 7,7 µg/L, 6,9 µg/L et 5,1 µg/L) dans 4 puits des plantations de palmiers (LAHOU). Les autres concentrations n'excèdent pas la norme de 5 µg/L pour l'eau potable. Toutefois, il a été décelé des niveaux moyens de concentrations dans les différentes zones hormis celle d'Abidjan: 2,45 µg/L pour Grand-lahou, 4,73 µg/L pour Yamoussokro et 3,56 µg/L pour Buyo. Les autres résidus de pesticides trouvés sont parfois spécifiques à des zones ; c'est le cas des résidus :
- *Du diméthoate et de la Dieldrine à Grand-Lahou et Buyo* avec des concentrations respectives en Dieldrine de 0,28µg/L et 0,470µg/L dans 30% des échantillons. Le diméthoate a respectivement des taux de 3,23 µg/L et 3,45 µg/L dans 8% des échantillons.
- *Du carbendazime, du thiabendazole et du chlorothalonil en Abidjan* (essentiellement les zones de maraîchage et de plantations de bananiers et d'ananas). Les deux premières molécules présentent des teneurs moyennes respectives de 3,24 µg/L et 8,52µg/L dans 33 % des puits échantillonnés, et le chlorothalonil 1,15 µg/L dans 8 % de ces puits. Certains résidus, principalement des herbicides (amétrine, simazine, diuron...) ont également été détectés avec des concentrations inférieures à 0,1µg/L.

Différentes familles chimiques de pesticides, principalement des organophosphorés et des organochlorés ont été trouvées dans les nappes des différentes zones (figure 8).

Les pesticides organophosphorés présentent les concentrations moyennes les plus élevées dans un échantillon moyen, toutes zones confondues, avec notamment le profenofos (9,5 µg/L), le malathion (2,7 µg/L) et le chlorpyriphos (3,58 µg/L).

Les pesticides organochlorés ont été révélés les plus présents dans l'ensemble des puits contaminés (78 %). L'échantillon moyen contient du lindane (1,41 µg/L), de l'endosulfane (3,057 µg/L total), de l'heptachlore (1,93 µg/L) et de la dieldrine (0,375 µg/L).

Des concentrations élevées en résidus de pesticide ont été détectées dans les échantillons moyens des quatre zones d'étude (respectivement 25,63 µg/L , 21,08 µg/L, 16,54 µg/L et 14,29 µg/L à Abidjan, Yamoussokro, Grand Lahou et Buyo). Ces résultats sont alarmants au regard de la norme recommandée pour les eaux destinées à la consommation humaine (0,5 µg/L).

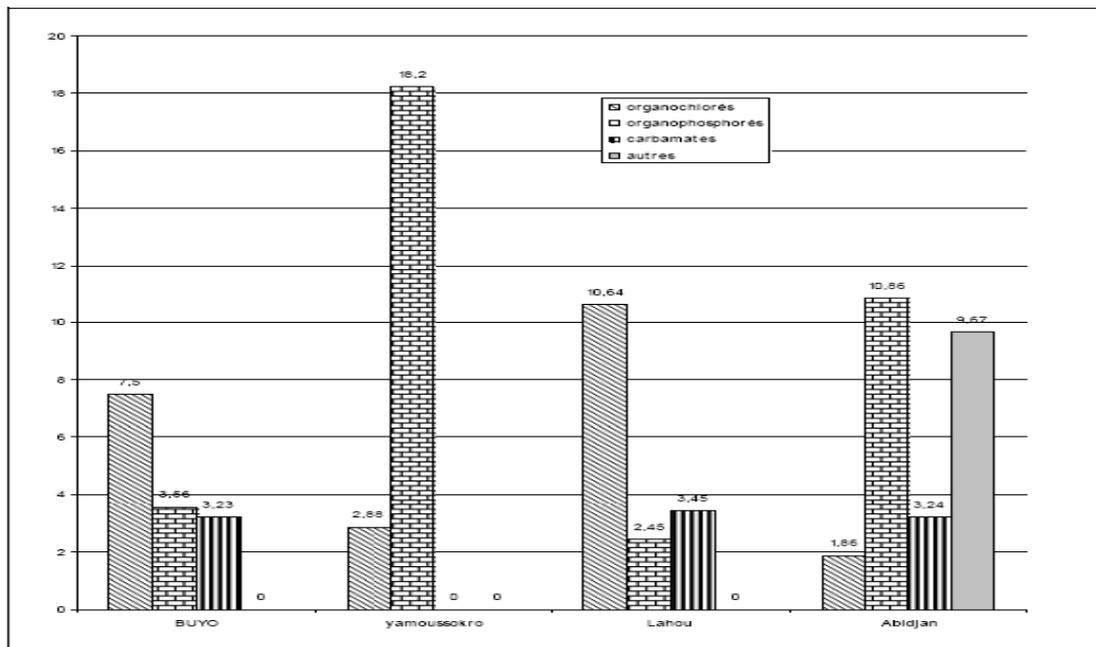


Figure 8: Contamination des zones agricoles par différentes familles de pesticides (Traore et al. 2006)

Tableau 4: Comparaison inter zone (concentration de résidus en µg/L dans un échantillon moyen) (Traore et al. 2006)

	Buyo	Yamoussokro	Grand-Lahou	Abidjan
Organochlorés	7,5	2,88	10,64	1,86
Organophosphorés	3,56	18,2	2,45	10,86
Carbamates	3,23	0	3,45	3,24
Autres	0	0	0	9,67
Total résidus	14,29	21,08	16,54	25,63

Le tableau révèle des taux en pesticides organophosphorés plus élevés à Yamoussokro et Abidjan (respectivement 18,2 µg/L et 10,2 µg/L). En effet, il a été précisé que dans ces zones, les cultures maraîchères sont très diverses et occupent de grandes superficies où plusieurs types de légumes sont cultivés sur les mêmes espaces. Pour cette raison, les pesticides employés sont très variés et en grandes quantités.

II.1.5 Conclusion

Les analyses effectuées sur les eaux des puits révèlent de grandes disparités de contamination selon la zone de culture considérée. Les résultats des analyses montrent que l'eau souterraine n'est pas de bonne qualité car d'après ces résultats, la majorité des puits échantillonnés présentent des concentrations supérieures à la norme relative à l'eau potable.

II.2 CAS DE LA POLLUTION AGRICOLE DES EAUX DANS LE BASSIN DU NAKANBE: CAS DES RESERVOIRS DE LOUMBILA ET DE MOGTEDO (BURKINA FASO)

II.2.1 Introduction

L'utilisation intensive des surfaces agricoles contribue à perturber l'équilibre fragile des ressources environnementales. Cela se traduit, notamment par une altération de la qualité des eaux induite par les pollutions diffuses d'origine agricole. En effet, l'agriculture moderne utilise de plus en plus d'intrants chimiques (fertilisants, pesticides) susceptibles d'être transférés vers les milieux aquatiques et de constituer alors des sources de pollution diffuse non négligeables. C'est d'ailleurs le cas au Burkina Faso où des études ont mis en évidence un cas de pollution agricole au niveau de deux réservoirs d'eau (Loumbila et Mogtédó) d'un bassin, celui du Nakanbé. En effet, dans le bassin du Nakambé, la construction de 400 réservoirs d'eau a eu pour conséquence le développement de l'agriculture sèche et l'impulsion de la pratique d'utilisation d'intrants (engrais, pesticides etc.). L'épandage excessif de ces produits sur des parcelles situées autour des réservoirs (en particulier ceux de Loumbila et de Mogtédó) a conduit à la dégradation de la qualité des eaux de ces réservoirs. L'objectif de l'étude était de fournir des éléments scientifiques en vue de l'appréciation du rôle de la pratique agricole sur les eaux de surface et de contribuer à des prises de décision pour une gestion efficace des problèmes écologiques autour des réservoirs d'eau du Burkina Faso.

II.2.2 Approche méthodologique

Présentation des sites d'étude

Les études ont été réalisées sur deux sites : Loumbila en zone périurbaine et Mogtédó en zone rurale (figure 9).

Le site de Loumbila est situé à 17 Km au nord de Ouagadougou (Burkina Faso). Il est caractérisé par un réservoir qui constituait la principale source d'eau potable pour la ville de Ouagadougou. Le « barrage » de Loumbila est d'un volume nominal de 42,2 millions de m³ (Dembélé et al. 2006). Il est compris entre les parallèles 12°28' et 12°34' de longitude Ouest et les méridiens 01°17' et 01°28' de latitude Nord.

Le climat est de type nord soudanien avec une pluviométrie moyenne annuelle variant entre 700 et 800 mm mais peut atteindre quelquefois 900 mm. Les maxima de précipitation se situent entre août et septembre.

Les températures sont assez élevées et varient d'un minimum de 16°C en décembre à un maximum de 40°C en mars et avril.

Les types de sol sont : les lithosols, les sols halomorphes et ferrugineux.

Le substratum est constitué par des granites birrimiens calco-alcalins alternant avec des granites migmatiques plus acides.

Le site de Mogtédó : est situé dans le bassin du Nakanbé à 85 km à l'est de Ouagadougou. Le réservoir qui le caractérise est d'un volume de 6 560 000 m³ compris dans un bassin versant de 465 km² (Dembélé et al., 2006). La digue est géographiquement localisée sur le parallèle 00°50' Ouest et le méridien 12°11' Nord à une altitude de 272 m au dessus de la mer. Principale source d'eau pour les activités socio-économiques des populations de Mogtédó et alentours, le réservoir de Mogtédó comporte un périmètre irrigué en aval de 123 ha et un bas-fond non aménagé en amont et en aval.

Le climat est de type nord soudanien, caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle voisine de 720mm et une végétation de savane anthropique faite d'espèces soudaniennes et sub-sahéliennes.

La température moyenne journalière varie entre 25° et 33° (Sally et al., 1997).

Le sous sol du bassin versant est en grande partie constitué de granite et de migmatite surmontée d'une mince épaisseur de latérite. On y rencontre aussi des formations à schiste et amphibolite.

Les deux sites ont en commun la présence de réservoir autour duquel s'est développée une activité agricole de saison sèche.

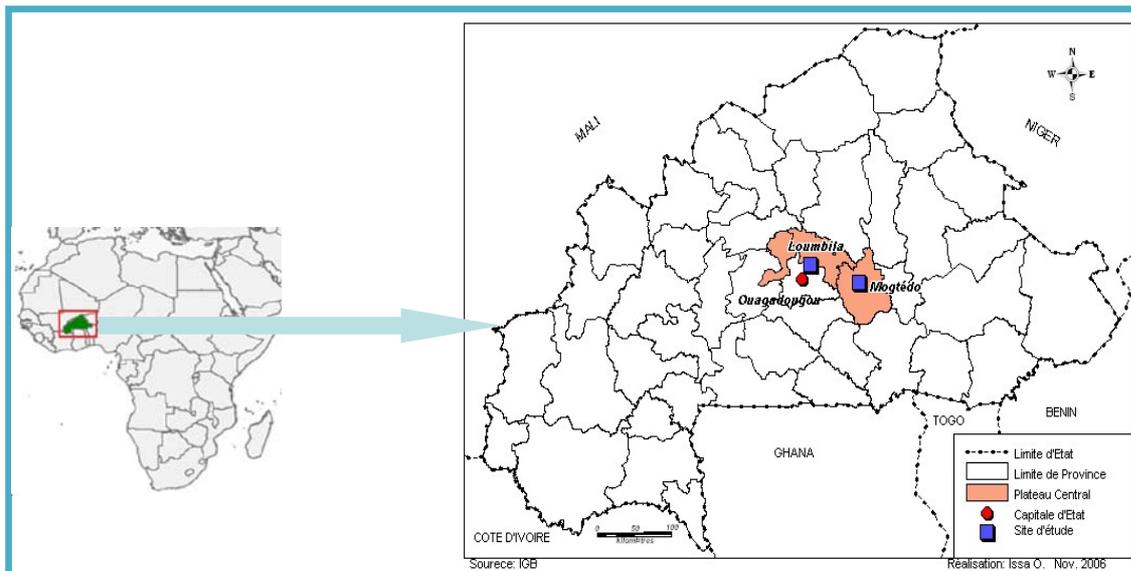


Figure 9 : site d'étude (Somé et al.)

- **l'analyse des eaux** a été portée sur les paramètres physico-chimiques tels que :
 - Le pH, la turbidité et la conductivité mesurés directement sur le terrain.
 - Les nitrates, les ortho-phosphates, les sulfates, le potassium, les chlorures, le sodium, les fluorures, le fer total analysés au labo.
- **Une enquête terrain** a été effectuée en vu d'inventorier les polluants potentiels (pesticides utilisés) autour de ces deux réservoirs.

II.2.3 Résultats/discussions

L'analyse des eaux des deux réservoirs (Loumbila et Mogtédou) met en évidence des fortes turbidités (1000NTU) en amont du réservoir de Loumbila et 1031 NTU sur l'ensemble du plan d'eau à Mogtédou (tableau 5) en début de saison pluvieuse. Cependant, des plus faibles valeurs ont été enregistrées en fin de saison pluvieuse (27 NTU et 144 NTU respectivement à Loumbila et à Mogtédou). Toutefois, ces valeurs sont dans l'ensemble au dessus de la norme OMS pour l'eau de boisson fixée à 5 NTU.

Des valeurs moyennes de pH ont été observées (6,8 et 7,1 respectivement à Loumbila et à Mogtédou) au cours de la saison pluvieuse (tableau 5). On constate également au niveau du tableau 5 des valeurs moyennes de conductivité électriques relativement supérieures à Loumbila (78 $\mu\text{S}/\text{cm}$) qu'à Mogtédou (57 $\mu\text{S}/\text{cm}$). De tels résultats montrent une minéralisation plus importante des eaux à Loumbila qu'à Mogtédou.

Tableau 5: Caractéristiques des eaux des réservoirs de Loumbila et de Mogtéo (Somé et al. ..)

	Turbidité (NTU)	pH	Conductivité (μS/cm)
LOUMBILA	223	6,8	78
MOGTEDO	465	7,1	57
Normes OMS (2004)	5	6,5 à 8	50 à 150

Les analyses physico-chimiques ont révélés des teneurs moyennes en éléments représentés dans le tableau 6.

Tableau 6 : Teneur moyenne en éléments dans les réservoirs de Loumbila et de Mogtéo (en mg/L) (Somé et al. ..)

Site	Chlorures	Fluorures	O-phosphates	Nitrates	Sulfates	Potassium	Sodium	Fer total
Mogtéo	3,69	0,0785	0,1275	7,11	51,53	2,20	2,20	2,24
Loumbila	3,13	0,1385	0,0465	3,13	32,12	2,32	2,13	0,76
OMS 2004	250	1,5	--	11,4	250	200	200	0,3
Eutrophisation	--	--	≥0,01	≥0,3	≥0,5	--	--	--

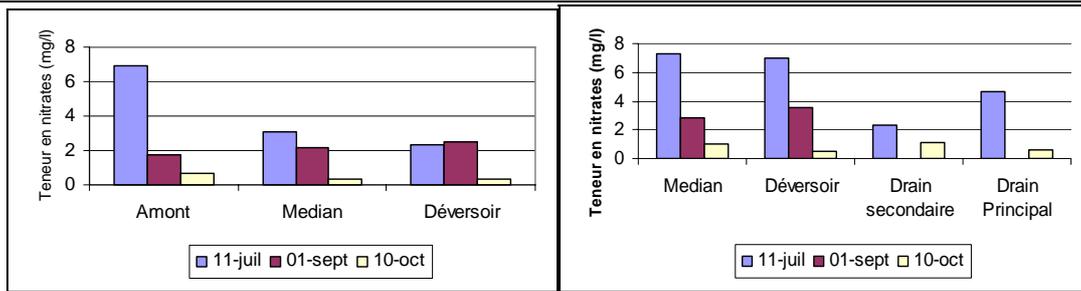
Le tableau révèle des teneurs moyennes en fer plus élevées à Mogtéo (2,24mg/l) qu'à Loumbila (0,76 mg/l). Dans les deux cas ces valeurs sont au dessus de la norme OMS pour l'eau de boisson fixée à 0,3mg de fer/l. De même, les concentrations en nitrates, en orthophosphates, en sulfates, en chlorures et en sodium sont plus élevées dans les eaux à Mogtéo qu'à Loumbila, tandis que les fluorures et le potassium sont plus présents dans les eaux à Loumbila. On constate également que parmi tous ces éléments, seul le fer présente des

concentrations supérieures à celles définies par la norme OMS pour l'eau de boisson au niveau des deux réservoirs. Cela prouve que le fer constitue l'élément responsable de la pollution des eaux des réservoirs de Loumbila et de Mogtéo.

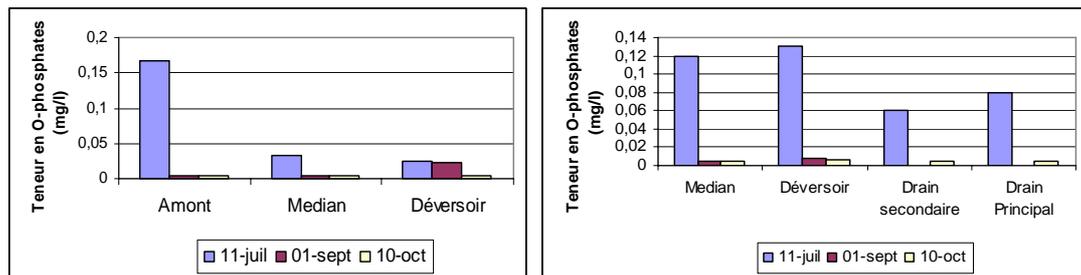
En outre selon les limites fixées par Maureaud en 1978, les nitrates, les phosphates et les sulfates participent à l'eutrophisation des eaux dans les deux réservoirs.

Au regard de la teneur des eaux en éléments, les nitrates, les phosphates et les sulfates participent à l'eutrophisation des eaux à Loumbila comme à Mogtéo. En effet, Au-delà des concentrations de 0,3 mg/l, 0,01 mg/l et 0,5 mg/l respectivement de nitrates, de phosphates et de sulfates, ces éléments contribuent à l'eutrophisation (Nisbet et Verneaux, 1970).

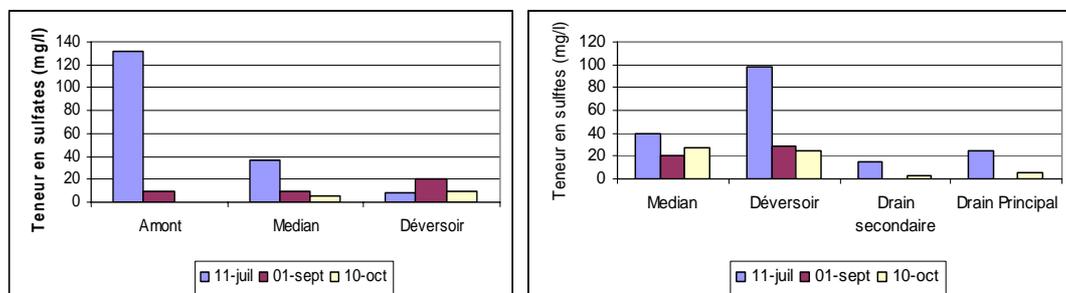
Les analyses physico-chimiques ont également mis en évidence des variations de la concentration des éléments (représentés dans le tableau 6) dans l'espace et dans le temps. Ces variations sont représentées au niveau des figures 10, 11 et 12.



Teneur en nitrates dans les réservoirs de Loumbila (gauche) et de Mogtédó (droite)



Teneur en ortho-phosphates dans les réservoirs de Loumbila (gauche) et de Mogtédó (droite)



Teneur en sulfates dans les réservoirs de Loumbila (gauche) et de Mogtédó (droite)

Figure 10: Variation de la teneur en nitrates, en ortho-phosphate et en sulfate en fonction du temps et de la station dans les réservoirs de Loumbila et de Mogtédó (Somé et al. ...)

La figure montre des teneurs moyennes en nitrates, en ortho-phosphate et en sulfate plus importantes en amont à Loumbila et dans tout le réservoir à Mogtédó en saison pluvieuse (Juillet). Cependant, on constate une baisse des concentrations jusqu'aux plus faibles valeurs en fin de saison pluvieuse (octobre).

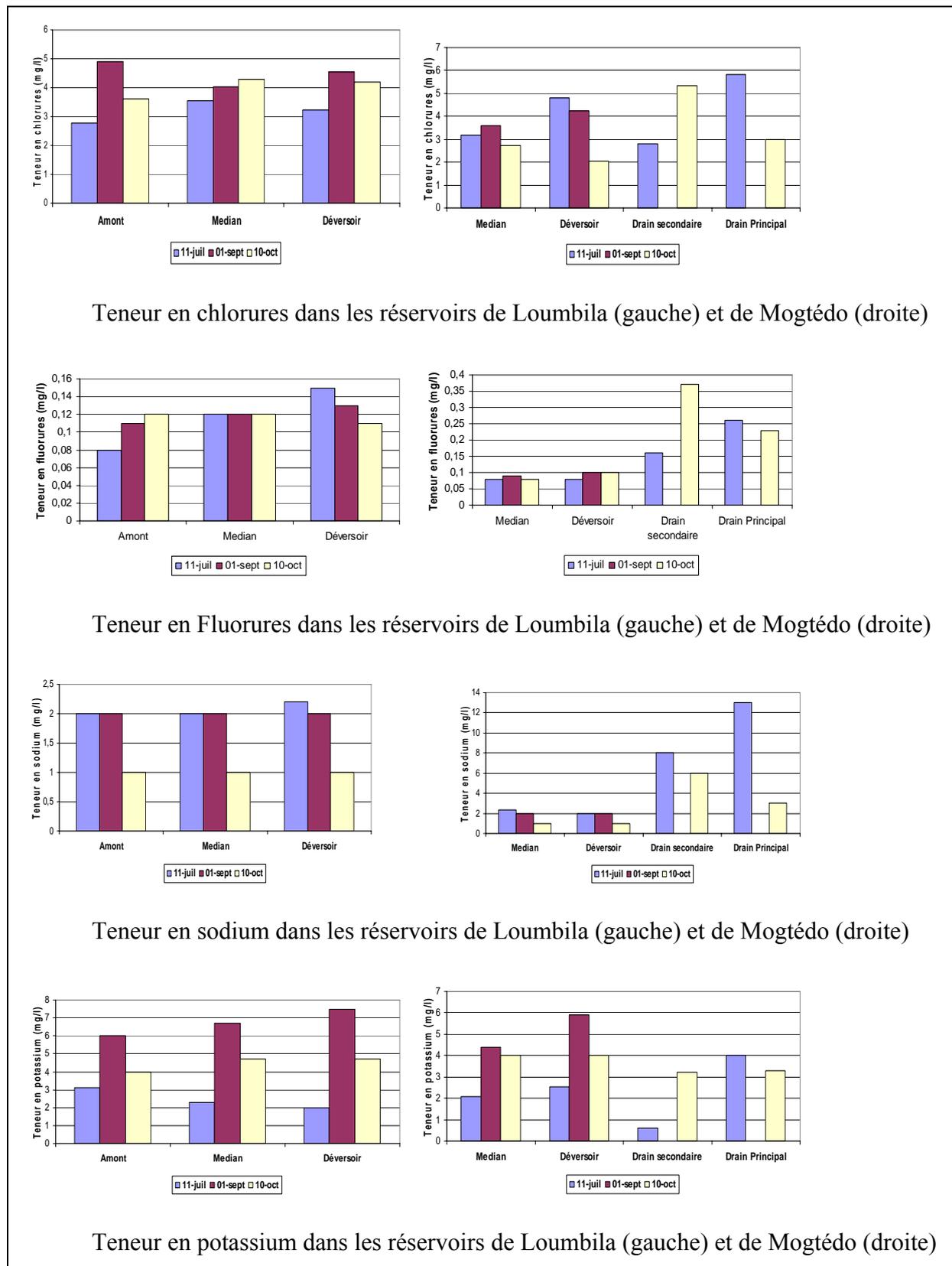


Figure 11: variation de la teneur en chlorures, fluorures, sodium et potassium dans les eaux des réservoirs de Loumbila et de Mogtédó (Somé et al. année.)

La figure révèle des teneurs en chlorures, en potassium, en sodium et en fluorures plus importantes dans les eaux du réservoir de Loumbila en saison des pluies qu'en fin de saison. Cependant les eaux de drainage à Mogtéo présentent des concentrations en fluorures plus élevées en fin de saison pluvieuses (octobre).

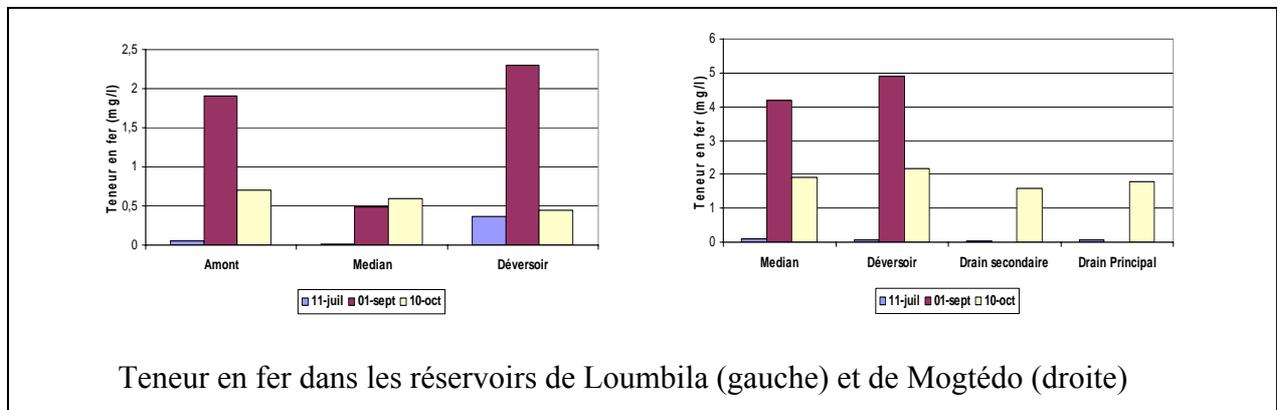


Figure 12: variation de la teneur en fer dans les eaux des réservoirs de Loumbila et de Mogtéo (Somé et al.. .)

On constate que le fer est pratiquement absent en début de campagne (juillet). Cependant, sa teneur augmente avec l'installation des pluies (Septembre), puis s'abaisse avec l'arrêt des pluies (Octobre).

Les enquêtes de terrain ont permis de faire le point des engrais (chimiques ou organiques) et des pesticides utilisés autour des deux réservoirs. À l'issue de ces enquêtes, il a été révélé que le NPK, le NPKBS, l'urée, le fumier, le compost et les ordures ménagères sont les fertilisants utilisés autour de ces réservoirs. Leur richesse en azotes, phosphates et sulfates expliquerait l'origine de ces éléments dans les eaux.

Le point sur les pesticides a révélé 9 types retrouvés à Loumbila et 19 types à Mogtéo. Parmi ces pesticides utilisés pour les cultures maraîchères, une bonne partie est constituée d'insecticides initialement destinés à la protection du cotonier (tableau 7).

Tableau 7: Insecticides utilisés à Loumbila et à Mogtéo (Somé et al. ..)

	Loumbila	Mogtéo
Insecticides cultures maraîchères	22%	14%
Insecticides coton	11%	86%
Insecticides polyvalents	67%	---

II.2.4 Conclusion

Le développement de l'agriculture sèche autour des réservoirs au Burkina Faso s'accompagne d'une eutrophisation des eaux de surface mettant en cause les nitrates, les phosphates et les sulfates. Dans les eaux du bassin du Nakambé, la pollution par le fer est la conséquence de la nature du substrat géologique. Le réservoir de Mogtéo court un risque de pollution aux nitrates du fait de l'intensité des activités agricoles au regard de la taille de ce réservoir.

RECOMMANDATIONS

Comme il apparaît à travers de nombreuses études réalisées, la pollution liée aux activités agricoles constitue de nos jours une des principales sources de polluants qui affectent la santé des eaux. À l'origine de la dégradation de la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines, la pollution agricole se justifie par l'utilisation irrationnelle des fertilisants et des pesticides. Cette gestion déficiente des engrais et des pratiques culturales entraîne la migration de plusieurs contaminants, tels que les nitrates, les phosphates, les micro-organismes et les pesticides vers les sources d'eau potable. Par voie de conséquence, Il arrive souvent que l'utilisation des sources d'approvisionnement en eau à des fins de consommation soit interdite à cause d'une telle pollution.

Ainsi, dans le contexte actuel de volonté de gestion intégrée des ressources en eau, il apparaît nécessaire d'adopter une meilleure gestion des intrants agricoles afin de préserver la qualité des eaux. Les réserves d'eau douces utilisables ne sont pas illimitées. Il faut donc les gérer, c'est-à-dire satisfaire les besoins en eau tout en protégeant les ressources, du point de vue quantitatif (éviter l'épuisement des réserves) et du point de vue qualitatif (maintenir la qualité de l'eau). Pour cela, une réduction significative des polluants diffus par la mise en place au champ de pratiques de conservation des sols et des eaux pourrait être une solution adéquate. La mise en place des dispositifs végétatifs (haies, bandes enherbées, cultures pérennes) compte parmi les techniques de conservation du sol et de l'eau les plus efficaces et les moins coûteuses. Ceux-ci limitent l'érosion et, en ralentissant la circulation de l'eau, favorise la dégradation des molécules phytosanitaires et la réduction des flux de nitrates et des phosphates. Les dispositifs enherbés s'avèrent très efficaces à capter les polluants entraînés par le ruissellement superficiel. Selon (DRAF, 2005) une largeur de 5 m minimum de bandes enherbées est nécessaire pour avoir un impact sur la qualité des eaux. Les essais conduits par Arvalis-Institut du Végétal ont mis en évidence une réduction des concentrations en produits phytosanitaires de 71 % pour une bande de 6 m, 84 % pour une bande de 12 m et 91 % pour une bande de 18 m, une efficacité apparemment indépendante des types de molécules, et aucune accumulation des molécules au niveau des bandes enherbées. Pour empêcher la migration des polluants vers les points d'eau (puits, forages, barrages...) on pourra mettre en place des périmètres de protection autour de ces points d'eau. Un périmètre de protection correspond à la surface entourant un point d'eau dans laquelle des mesures doivent être prises pour empêcher des contaminants de migrer et de contaminer l'eau prélevée par ce point d'eau.

De même, il apparaît important pour préserver les milieux aquatiques, de réglementer les rejets et d'assurer un contrôle de la qualité des eaux.

Par ailleurs, le transfert des produits phytosanitaires vers les eaux pourrait être limité en respectant les points suivants :

- limiter les transferts liés à la pluviométrie en prenant soin de ne pas traiter s'il y a risque de pluie dans les 2 à 3 heures qui suivent la pulvérisation. Plus la pluie intervient rapidement après le traitement, plus le risque de contamination des eaux, par ruissellement ou par infiltration, est important.
- limiter les risques de transferts par les réseaux de drainage agricole :
 - en privilégiant l'utilisation des molécules les moins solubles possibles
 - en décalant les applications de produits phytosanitaires sur les périodes où les réseaux de drainage ne coulent pas (traitement précoce en automne en particulier).
- limiter les risques de dérive des embruns, pour cela :
 - viser une température ni trop basse, ni trop élevée pour limiter l'évaporation des gouttes,
 - éviter de traiter par vent fort, ce qui limite également l'évaporation,
 - privilégier la présence de dispositifs végétalisés (en particulier des haies), éloignant le pulvérisateur des points d'eau et faisant éventuellement obstacles à la circulation des embruns de pulvérisation.
- mesurer et limiter la fertilisation pour éviter tout excès d'azote inutile aux plantes et aux sols
- épandre les engrais à des périodes favorables où les plantes pourront les utiliser de façon optimale,
- ne pas laisser les sols nus en hiver, ce qui a pour avantage de consommer une partie des nitrates présents dans les sols et par conséquent de réduire les flux de ces derniers,

CONCLUSION GENERALE

Les eaux douces superficielles et souterraines sont le siège de pollutions dues à des substances organiques (déchets urbains, agricoles ou industriels), des substances toxiques (pesticides, par exemple) ou des substances fertilisantes (nitrates et phosphates en particulier). La qualité des eaux (superficielles et souterraines) est de plus en plus mise en cause par les activités humaines et en particulier par les activités agricoles. La pollution agricole des ressources en eau est surtout due aux engrais et aux produits phytosanitaires. Ces derniers constituent la principale source de pollution des eaux souterraines en Côte d'Ivoire où 67% de 89 puits échantillonnés sont contaminés par trois familles de pesticides (organochlorés, organophosphorés et carbamates). Les produits phytosanitaires constituent un danger pour l'environnement et les écosystèmes aquatiques du fait de leur rémanence et de leur persistance plus ou moins longue dans un environnement donné. En effet, certains de ces produits (comme la DDT) sont peu dégradables et peuvent se concentrer dans les organismes en bout de chaîne alimentaire, par bio-accumulation, avec des risques certains pour la santé humaine. Au Burkina Faso le développement de l'agriculture sèche autour des réservoirs s'accompagne d'une utilisation intensive des engrais (NPK, NPKBS...) et par conséquent d'une eutrophisation des eaux de ces réservoirs (eutrophisation liée aux nitrates, phosphates et sulfates). L'eutrophisation constitue l'un des problèmes majeurs liés à l'enrichissement excessif de l'eau en nutriments (azote et phosphore). Par ailleurs, les rivières sont capables de s'auto-épurer grâce aux microorganismes présents dans l'eau. Néanmoins cette autoépuration devient inopérante dès lors que la quantité de polluant dépasse un seuil critique. D'une manière générale, la pollution agricole des eaux résulte de l'usage irrationnel des intrants agricoles (épandage excessif des engrais et pesticides sur les cultures). De ce fait il convient d'adopter une meilleure gestion de ces intrants afin de préserver la qualité des eaux (superficielle et souterraines).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALHOU B., 2000. Approche géochimique de la pollution des eaux souterraines du continental terminal de la ville de Niamey. Mémoire de DESS, CRESA, Univ. Niamey, 53 p.

ALHOU Bassirou, 2007 : Impact des rejets de la ville de Niamey (Niger) sur la qualité des eaux du fleuve Niger : 299p

Armbrut K.L., (2000)- Pesticide hydroxyl radical rate constants : Measurements and their importance in aquatic environments- *Environmental Toxicology and Chemistry*, 9, 19, pp. 2175- 2193.

Baudu M., (1995)- Pollution urbaine par temps de pluie: qualité et traitement des rejets, Recueil des interventions, Université d'été- ENSIL- Limoges, 20, pp 1-20.

Belamie R., R. Calvet and P. Chassin, 1997. Les transferts sol-eau des produits phytosanitaires. L'eau dans l'espace rural, production végétale et quantité de l'eau, INRA Edition, 231-248

Belhaj A., (2001)- Les épidémies d'origine hydrique dans le monde- Synthèse Technique- ENGRET centre de Montpellier et OIE de Limoges, pp 1-16.

Bertrand de Bruyn, (2004). Étude de la vulnérabilité des eaux aux produits phytosanitaires : indicateur environnemental et modèle mécaniste, en vue d'une meilleure gestion du bassin versant de la Leysse (Savoie). Thèse : 256p

BERTRAND H., 1954. Les insectes aquatiques d'Europe (genre : larves, nymphes, imagos).Vol. II. Trichoptères, Lépidoptères, Diptères, Hyménoptères. Editions Paul Lechevalier, Paris (VIe), 547 p.

Blandine Lemercier, Novembre - Décembre 2003. La pollution par les matières phosphorées en Bretagne : Sources, transfert et moyens de lutte. 85p.

Calamari, 1985. Situation de la pollution dans les eaux intérieures de l'Afrique de l'ouest et du centre. *Document.Occasionnel*, Comité des Pêche Continentales pour l'Afrique/FAO, 12, 28 p.T H È S E : 256p

Calvet, R., Gouy, V., Gaillardon, P. et Belamie, R. (1996). Distribution des molécules pesticides entre les phases solides et liquides du sol. Signification du coefficient de

distribution. CEMAGREF, L. (Ed.). HyfrOsystemes. Groupe Français des Pesticides. Nancy. 22-23 mai 1996. 104-115 p.

Carluer, N. (1998). Vers une modélisation hydrologique adaptée à l'évaluation des pollutions diffuses : prise en compte du réseau anthropique. Application au bassin versant de Naizin (Morbihan). Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, Paris. 335 + annexes p.

Céline Chouteau, Novembre 2004 : Développement d'un biocapteur conductimétrique bioenzymatique à cellules algales, thèse 180p

Colin, F. (2000). Approche spatiale de la pollution chronique des eaux de surface par les produits phytosanitaires. Cas de l'atrazine dans le bassin versant du Sousson (Gers, France). Thèse de doctorat de l'ENGREF, PARIS VI, Montpellier. 233 p.

Comifer, 2002. Lessivage des nitrates en système de cultures annuelles. Diagnostic du risque et propositions de gestion de l'interculture, 41p.

Comifer, 2002. Lessivage des nitrates en système de cultures annuelles. Diagnostic du risque et propositions de gestion de l'interculture, 41p.

DEMBELE Y., SOME L., SOME K., KONATE L., KONSEIGA K.R. et DISSA A., 2006. Gouvernance transfrontalière de l'eau et de la nourriture dans le Bassin de la Volta, Burkina Faso: étude de cas. IWMI-INERA, 95p.

DIALLO E. M. A. et DIALLO T., 2004. Evaluation des opportunités et contraintes au développement dans la portion nationale du bassin du fleuve Niger. Etude multisectorielle nationale (Guinée). Autorité du Bassin du Niger (ABN) et Agence Canadienne pour le Développement International (ACDI), 330 p.

DRAF-SRPV Lorraine, Mars 2005 : Voies de transfert de pesticides vers les eaux

Fardeau J.C., Morel C., Boniface R., 1988. POURQUOI CHOISIR LA METHODE OLSEN POUR EVALUER LE PHOSPHORE « ASSIMILABLE » DES SOLS. AGRONOMIE, 8 (7): 577-584.

Francisco S.B., Ward R. et Beasley H., (1999)- A new technique to measure bird's dietary exposure to pesticides- *Analytica Chimica Acta*, 399, pp. 173-183.

François Colin, 2000, thèse, 255p : approche spatial de la pollution chronique des eaux de surface

Géza JOLANKAI, 1992. Les impacts de l'agriculture sur les ressources en eau et les voies de transfert par l'eau dans l'environnement, 48p

Inades Formation, 2001 : Pour une gestion durable des ressources naturelles en Afrique : 174p.

Jury W.A., Spencer W.F. et Farmer W.J., (1984)- Behavior assesment model for trace organics in soil: Application of screening model- *Journal Environ. Quality*, 13, pp. 573-579.138

Koskinen, W.C, Harper S. S., 1990-The retention process Mechanisms. Pesticides in soil environnement: Processes, impacts and modeling. Soil science society of America Book Series, no2 Cheng H.H., Denver, 51-78.

Koussao SOME, Youssouf DEMBELE, Leopold SOME, Pollution agricole des eaux dans le bassin du Nakambé: cas des réservoirs de Loumbila et de Mogtédo. Disponible sur: [http :/ www.2ie-edu.org/forum_crepa_07/Theme1/Theme_1.html](http://www.2ie-edu.org/forum_crepa_07/Theme1/Theme_1.html) - 16k

LAVOIE, I., I. LAURION et W.F. VINCENT, 2007. Les fleurs d'eau de cyanobactéries, document d'information vulgarisée. INRS rapport no 917,iii,27p.

LEBLANC G. A., 1995, Are Environmental sentinels signalling ? *Environmental Health Perspectives*, 103, 888-890

Legg, W. (1997). Ecological agriculture. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin*. 41-43.

Mallick K., Bhurati A., Banerji N., Shakil A. et Sethunathan A., (1999)- Bacterial degradation of chlorpyrifos in pure cultures and in soil- *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 62, pp. 48-54.

Marie THIOLLET-SCHOLTUS, Septembre 2004 : Construction d'un indicateur de qualité des eaux de surface vis-à-vis des produits phytosanitaires à l'échelle du bassin versant viticole, thèse, 180p

Mestres R, 1997. Protection des plantes et pesticides. Interêts et limites de leur emploi-Note Direction Générale de l'Alimentation, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Paris, 8pp.Nonequilibrium model and application to to soil reactors- *Journal of Contaminant Hydrology*,1, 43, pp.45-62.

NISBET M. et VERNEAUX J., 1978. Composition chimiques des eaux courantes : Discussion et proposition de classes en tant que base d'interprétation des analyses chimiques. *Annales de limnologie*. 6, 2, 161-190.

OMS : Directive de qualité pour l'eau de boisson. Recommandation. Genève, OMS 1 (1994).

Pimentel d., acquay h., biltonen m., rice p., silva m., nelson j., lipner s., giordan s., horowitz a., damore m., 1993, Assessment of environmental and economic impacts of pesticide use. In Pimentel & Lehman : The pesticide question : environment, economics and ethics. Routledge, Chapman and Hall, New York, 47-84

Pimentel, D. (1995). Amounts of pesticides reaching target pests: environmental impacts and ethics. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*. 8, 17-29.

SALLY H., KEITA A. et OUATTARA S., 1997. Analyse-diagnostic et performances de cinq périmètres irrigués autour de barrages au Burkina Faso. Tome 1, PMI-BF/IIMI, 252 p. Souiller C., Garon-Boucher C., Laillet B., Toccanier J., Liaudet F., Réal B. et Dutertre A., (2000)- La simulation de ruissellement : un outil d'évaluation de la capacité des dispositifs enherbés à dissiper les produits phytosanitaires- Actes du 30ème Congrès du Groupe Français des Pesticides, Reims, pp.363-373.

Tixier C., Bogaerts P., Sancelme M., Bronnemoy F., Twagilimana L., Cuer A., Bohatier J. et Veschambre H., (2000)- Fungal biodegradation of a phenylurea herbicide diuron: structure and toxicity of metabolites- *Pesticides Management Sciences*, 56, pp.455-462.

TRAORE Sory Karim, MAMADOU Koné, DEMBELE Ardjouma , LAFRANCE Pierre , MAZELLIER Patrick (3) et HOUENOU Pascal, 2006 . Journal Africain des Sciences de l'Environnement, (décembre 2006), Numéro 1, 1-9- Contamination de l'eau souterraine par les pesticides en régions agricoles en Côte d'Ivoire (centre, sud et sud ouest).

Van Der Werf, H. M. G. (1996). Assessing the impact of pesticides on the environment. *Agriculture, ecosystems and environment*. 60, 81-96.

Wander W.S., Dijkstra A., Gabriel J.M., Agterveld P.M., Noort P.C. et Parson R.J., (2002)- Competition of a parathion –hydrolyzing *Flavobacterium* with bacteria from ditch water in carbon-, nitrate- and phosphate- limited continuous cultures- *FEMS Microbiology Ecology*, 43, pp. 45-53.

Wauchope R.D., Buttler T.M., Hornsby A.G. and Augustijn-Beckers P.W.M. (1991). The SCS/ARS/CES pesticide properties database for environmental decision-making. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 123:1-164.

REFERENCES SITES INTERNET

- [R1] : [http : //www.agr.gc.ca/nlwis-snite/pub/hw_se/pdf/intro_f.pdf](http://www.agr.gc.ca/nlwis-snite/pub/hw_se/pdf/intro_f.pdf)
- [R2]: [http:// www.eau-rhin-meuse.fr/patrimoine/pollu/pol02.htm](http://www.eau-rhin-meuse.fr/patrimoine/pollu/pol02.htm) -
- [R3]: [http:// www.arvalisinstitutduvegetal.fr/fr/fichier/communique/395_Dossier.pdf](http://www.arvalisinstitutduvegetal.fr/fr/fichier/communique/395_Dossier.pdf) -
- [R4]: [http : // www.fao.org/docrep/V5996F/v5996f02.htm](http://www.fao.org/docrep/V5996F/v5996f02.htm) -
- [R5] : [http : // www.bretagne-environnement.org/lien/pollutions-naturelles-de-l-eau-](http://www.bretagne-environnement.org/lien/pollutions-naturelles-de-l-eau-)
- [R6]: <http://www.eaubretagne.fr/cybertheque/annuaire-des-acteurs/mot-cle/pollution-agricole->
- [R7]: [http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/preservation/04_diminuer.htm-](http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/preservation/04_diminuer.htm)
- [R8] : [http:// www.ec.gc.ca/WATER/fr/info/pubs/primer/f_prim04.htm](http://www.ec.gc.ca/WATER/fr/info/pubs/primer/f_prim04.htm)
- [R9]: <http://www.eaubretagne.fr/cybertheque/annuaire-des-acteurs/mot-cle/pollution-agricole-43k->.
- [R10]: [http:// www.agriculture-de-demain.fr/Pesticides/Definition.html](http://www.agriculture-de-demain.fr/Pesticides/Definition.html) -
- [R11] : [http:// www.arvalisinstitutduvegetal.fr/fr/fichier/communique/395_Dossier.pdf](http://www.arvalisinstitutduvegetal.fr/fr/fichier/communique/395_Dossier.pdf) -
- [R12] : http://www.eau-artois-picardie.fr/article.php3?id_article
- [R14]: [http:// www.fao.org/DOCREP/005/X2570F/X2570F00.HTM](http://www.fao.org/DOCREP/005/X2570F/X2570F00.HTM) -
- [R15] : [http:// www.fndae.fr/documentation/PDF/fndaehs04bis.PDF](http://www.fndae.fr/documentation/PDF/fndaehs04bis.PDF).
- [R16] : [http:// www.irda.qc.ca/_documents/_publications/5/29_fr.pdf](http://www.irda.qc.ca/_documents/_publications/5/29_fr.pdf).
- [R17]: [http:// www.irda.qc.ca/_documents/_publications/5/29_fr.pdf](http://www.irda.qc.ca/_documents/_publications/5/29_fr.pdf)
- [R18]: <http://www.divirama.com/dico/dictionnaire-6334.php> - 6k -
- [R19]: http://www.rhone-alpes.chambagri.fr/phytov3/pages/sols_pollution.htm -
- [R20]: http://www.symbiose-nc.com/cahier_agri/pdf/articles/16_engrais.pdf