

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE 8 MAI 1945 GUELMA

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie/Sciences de la terre et de l'Univers



Mémoire En vue de l'Obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Sciences de la Terre

Spécialité/Option : Hydrogéologie

Département : Sciences de la Nature et de la Vie

Thème:

**Simulation du transfert de polluants dans la
zone non saturée**

(cas du périmètre irrigué de Guelma)

Présenté par :

- ❖ **BALADJI Abd Errahim**
- ❖ **BENNOUR Amine**

Devant le jury composé de :

- | | |
|---|-----------------------------|
| ❖ Présidente : M^{me} BENNACER Leila | Université de Guelma |
| ❖ Examineur : Dr GUERIEB Lassed | Université de Guelma |
| ❖ Encadreur : Pr KACHI Slimene | Université de Guelma |

JUIN 2018

REMERCIEMENTS

*Au terme de ce travail, je remercie avant tout Dieu le tout puissant
qui a éclairé mon chemin tout au long de mes études.*

*Avant d'aborder mon sujet, qu'il me soit permis de remercier toutes les
personnes qui, à des degrés divers, ont contribué à la mise à jour de ce
mémoire:*

*En premier lieu je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements au
Professeur KACHI Slimene qui fut pour moi un directeur de mémoire
attentive et disponible malgré ses nombreuses charges et sans qui ce
mémoire n'aurait jamais vu le jour. Son précieux conseil et son aide
durant toute la période du travail. Ils ont été et resteront les moteurs
de mon travail.*

J'exprime tous mes remerciements à l'ensemble des membres du jury :

***Mme BENNACER Leïla** : Présidente du jury*

***Docteur GUERIEB Lassed** : Examineur*

*Enfin, Je tiens à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont
contribué à la réalisation de ce travail.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mon cher père (Kheïfa), source de respect, en témoignage de ma profonde reconnaissance pour tout l'effort et le soutien incessant qui m'a toujours apporté.

A ma chère mère (Ouanassa), source d'affectation de courage et d'inspiration qui a autant sacrifié pour me voir atteindre ce jour.

Je dédie ce travail spécial à ma chère grand-mère Akila et mon cher oncle ALI, que Dieu les préserve et prolonge sa vie.

Pour ma chère sœur Nour El Houda, et mon chère frère Mohamed Raïd

A toute la famille de

Baladjí et Boukef

A mes chers amis

Seïf chorfi, Salim, Mohamed Manouaa, Charoufa namoure, Ramzi, Fares, Khaled Semsouma, Idris, Imad Lavezzi, Abdou et Oussama Araar, Zinou Brahmia, Badis, Omar, Oussama tbib, Youssef, Amine, Foufou, Davide, Nabil, Zinou Traikia, Doudou, Amir, Abd El Ghafer Mohamdatni, Zeydou Boufelfel, Hamza khalil, Samir Chettibi, Merwan, Sou, Kamel, Tarak, Bachir, Haythem, Ali, Ala, Ilyes, Hmed, Mehdi, Housseem Agüero, Ayoub, Sista, Oussama Naït, Mohamed Layou, Rocky, Ala Mekhalfa, Socky, Rayane, Chahrazed, Rofaïda, Rym, Lina, Randa, Bouchra, Manel, Khadija, sans oublier tous les hommes et les femmes de

L N E A

A mon très cher binôme Amine et sa famille

En fin, je dédie ce travail à tous mes collègues et mes amis de la promotion Hydrogéologie et Géothermie 2017/2018.

Abd Errahim

DEDICACES

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour,
leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de
mes études,*

A ma sœur ...pour ça encouragements, et sa soutien moral,

*A mes chers frères ... pour leur appui et leur
encouragement,*

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon
parcours universitaire,*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant
allégués, et le fruit de votre soutien infailible,*

Merci d'être toujours là pour moi.

Amine

Résumé

Les objectifs principaux de ce projet de fin d'étude en hydrogéologie étaient la maîtrise de l'utilisation du logiciel Agriflux et son application dans le périmètre irrigué de Guelma.

Agriflux utilise le modèle mathématique représentant le bilan en eau (HydriFlux), concernant le bilan en azote (NitriFlux) et celui des pesticides PestFlux. Ces modèles mathématiques sont basés sur la représentation physique et mathématique des différents processus impliqués dans les cycles de l'eau, de l'azote et des pesticides.

Les pertes en azote nitrique même récemment injecté, sont très importantes et évaluées à $30 \text{ kg N-NO}^{-3}/\text{ha}/\text{an}$, donc le risque de contamination des eaux souterraines est très élevé. Par contre les pertes en endosulfan sont faibles et varient de 0.4 à $2.29 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{ha}/\text{an}$ à cause de la teneur élevée en matière organique du sol ($\text{MO} > 5\%$) sur laquelle est absorbé l'endosulfan.

Dans les eaux ruisselées, les concentrations simulées en nitrates et pesticides sont très élevées, et dépassent largement les normes internationales admises.

En fin, la réduction des apports de fertilisants et pesticides est une démarche nécessaire pour la mise en place d'une meilleure gestion de nos ressources hydriques à l'échelle du périmètre irrigué de Guelma.

الملخص:

الأهداف الرئيسية لهذا المشروع النهائي في الهيدرولوجيا هي إتقان استخدام برنامج Agriflux وتطبيقاته في المنطقة المروية في قالة.

يستخدم Agriflux النموذج الرياضي الذي يمثل توازن الماء (HydriFlux) ، فيما يتعلق بتوازن النيتروجين (NitriFlux) وتلك الخاصة بالمبيدات. PestFlux تعتمد هذه النماذج الرياضية على التمثيل الفيزيائي والرياضي لمختلف العمليات المتضمنة في دورات الماء والنيتروجين والمبيدات.

تعتبر خسائر النيتروجين، حتى لو تم حقنها مؤخرًا ، مهمة جدًا ويتم تقييمها عند 30 كغ $N-NO_3^-$ /ها/سنة ، مما يعني خطر تلوث المياه الجوفية مرتفع جدًا. ومن ناحية أخرى، تكون خسائر الإندوسلفان منخفضة وتتراوح من 0.4 إلى 2.29×10^{-3} كغ/ها/سنة، بسبب المحتوى المرتفع في المادة العضوية للتربة ($MO > 5\%$) التي يتم امتصاص الإندوسلفان فيها. في المياه الجارية، تكون تركيزات النترات والمبيدات المحاكية عالية جدًا ، وتتجاوز بكثير المعايير الدولية المقبولة.

في النهاية ، يعد الحد من مخصبات الأسمدة ومبيدات الآفات خطوة ضرورية لتنفيذ إدارة أفضل لمواردنا المائية في جميع أنحاء منطقة قالة المروية.

Abstract

The main objectives of this end of study project in hydrogeology were the mastery of the use of the software Agriflux and its application in the irrigated area of Guelma. Agriflux uses the mathematical model representing the water balance (HydriFlux), concerning the nitrogen balance (NitriFlux) and of pesticides (PestiFlux). These mathematical models are based on the physical and mathematical representation of the different processes involved in the cycles of water, nitrogen and pesticides.

The losses of nitrate and nitrogen which are recently injected are very important and evaluated at 30 kg N-NO₃ /ha/ year, which means that the risk of contamination of groundwater is very high. On the other hand, endosulfan losses are low and range from 0.4 to 2.29 x10⁻³ kg/ha/year because of the high content of soil organic matter (MO > 5%) on which endosulfan is absorbed.

In run-off water, the simulated concentrations of nitrates and pesticides are very high, and far exceed the international standards which are accepted.

Finally, the reduction of fertilizer and pesticides inputs is a necessary step to put in place a better management of our water resource at the scale of the irrigated perimeter of Guelma.

TABLE DES MATIERES

	Page
Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Table des matières	
Illustrations	
Introduction générale	01
Chapitre I. Présentation de la zone d'étude	03
1. Situation géographique	03
2. Le réseau hydrographique	04
3. Caractérisation géologique	04
4. Caractérisation climatique	05
4.1. Diagramme pluviométrique de Gausсен (P = 2T)	06
4.2. Etude des paramètres climatiques	07
4.2.1. Les précipitations	07
4.2.2. Température	09
4.3. Bilan hydrique	10
5. Caractérisations hydrogéologiques	12
6. Présentation du périmètre irrigué de Guelma	14
6.1. Volume annuel d'eau pompé de l'Oued Seybouse	14
6.2. Les sols du périmètre	15
6.3. Types de cultures	16
Chapitre II. Pollution des eaux	18
Introduction	18
1. Types de pollution	18
1.1. Agricole	18
2. Rétention et transformation des produits phytosanitaires dans le sol	19
2.1. Processus de rétention	19
2.1.1. Phénomènes d'adsorption/désorption	20
2.2. Processus de transformation	20
3. Transport des produits phytosanitaires dans le sol	21
3.1. Transport de pesticides par l'eau mobile	21
Chapitre III. Présentation du logiciel Agriflux 2.0	22

Avertissement à l'utilisateur	22
1. Présentation et structure du modèle	22
1.1. Le bloc ENTRÉES	23
1.2. Le bloc SIMULATIONS	23
1.3. Le bloc SORTIES	23
1.4. Les fichiers	23
1.4.1. Fichiers entrés	24
1.4.2. Fichiers résultats	24
2. Approche statistique	27
2.1. Présentation des paramètres des fichiers	27
2.1.1. Fichier simulation (*.SIM)	28
2.1.2. Fichier sol (*.SOL)	29
2.1.3. Fichier climat (*.CLI)	30
2.1.4. Fichier précipitation (*.PRE)	32
2.1.5. Fichier cycle de l'azote (*.AZO)	32
2.1.6. Fichier fertilisant (*.FER)	33
2.1.7. Fichier Caractéristiques d'un pesticide (*.CPE)	35
2.1.8. Fichier Application de pesticides (*.APE)	36
2.1.9. Fichier Caractéristiques d'une culture (*.CCU)	37
3. EXÉCUTION ET RÉSULTATS	38
3.1. Choix des fichiers de simulation	38
3.2. Visualisation des résultats	39
Chapitre IV. Résultats et discussions	40
Introduction	40
1. La recharge et bilan hydrique	40
2. Simulation des flux de l'azote nitrique	44
3. Simulation des pesticides	49
3.1. Transfert de l'endosulfan	49
Conclusion et perspectives	55
Références Bibliographiques	57

Illustrations

LISTE DES FIGURES

N°	Figure	Page
01	Situation géographique de la zone d'étude	03
02	Le réseau hydrographique du bassin de Guelma	04
03	Carte structurale de la région de Guelma, extraite de la carte géologique (JM.Vila, 1988)	05
04	Diagramme pluviométrique à la station de Belkheir.	06
05	Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles à la station de Guelma (1985-2013).	08
06	Variation interannuelle des précipitations à la station de Guelma (1985-2013).	08
07	Variation des températures moyennes mensuelles à la station de Guelma (1985-2013).	09
08	Evolution des températures moyennes annuelles à la station de Guelma (1985-2013).	10
09	Représentation graphique des paramètres du bilan hydrologique	12
10	Coupe hydrogéologique dans la plaine de Guelma, montrant la présence des aquifères (alluvionnaire et fissuré) et la relation alluvions travertins (B.Gaud, 1974)	13
11	Présentation du périmètre irrigué de Guelma-Boucheougouf	14
12	Volumes affectés à l'irrigation à partir du barrage de Hammam Debagh	15
13	Evolution des volumes d'eau consommés par année dans le périmètre de Guelma-Boucheougouf (d'après O.N.I.D. 2013)	15
14	Répartition des superficies en extension par type de culture/année	16
15	Evolution de la production agricole des tomates industrielles et pommes de terre (1985 à 2013) dans le périmètre irrigué de Guelma(ONID)	17
16	Le modèle Agriflux 2.0	22
17	Fichiers d'entrés et fichiers des résultats	26
18	Fenêtre principale d'AgriFlux2.0	26
19	Fenêtre des choix des lois et paramètres	27
20	Fenêtre de définition de la simulation	28
21	Fenêtre de définition des caractéristiques générales du sol	30
22	Fenêtre de définition des données climatiques	31

23	Fenêtre de définition des caractéristiques générales du cycle de l'azote	33
24	Fenêtre de définition des caractéristiques des fertilisants	35
25	Fenêtre de définition des caractéristiques générales du pesticide	37
26	Fenêtre de définition des applications de pesticides	38
27	Fenêtre de définition des caractéristiques d'une culture	39
28	Fenêtre de lancement de la simulation	40
29	Flux d'eau lessivée	40
30	Simulation des flux d'eau lessivés et ruisselés pour un an (2007-2008)	42
31	Simulation des flux d'eau lessivés et ruisselés pour cinq ans (2007-2013)	43
32	Simulation des flux de nitrates lessivés et ruisselés pour un an (2007-2008)	45
33	Simulation des concentrations des nitrates lessivés et ruisselés pour un an (2007-2008)	46
34	Simulation des flux de nitrates lessivés et ruisselés pour cinq ans (2007- 2013)	47
35	Simulation des concentrations des nitrates lessivés et ruisselés pour cinq ans (2007-2013)	48
36	Simulation des flux de l'endosulfan lessive et ruisselé pour un an (2006- 2007)	51
37	Simulation des concentrations de l'endosulfan lessivés et ruisselés pour un an (2007-2008)	52
38	Simulation des flux de l'endosulfan lessivé et ruisselé pour cinq ans (2007-2013)	53
39	Simulation des concentrations de l'endosulfan lessivés et ruisselés pour cinq ans (2007-2013)	54

LISTE DES TABLEAUX

N°	Tableau	Page
01	Les caractéristiques et situations topographiques de la station pluviométrique de Guelma.	06
02	Bilan hydrique à la station de Guelma (1985-2013) selon la méthode de Thornthwaite	11
03	Fonctions des éléments primaires (N P K). (Source : adaptée du manuel de statistiques des Engrais de la FAO,	19
04	Extensions des fichiers résultats	25
05	Structure d'un fichier Simulations (*.SIM)	28
06	Structure du fichier Caractéristiques du sol (*.SOL)	29
07	Structure d'un fichier Climat (*.CLI)	31
08	Structure d'un fichier Précipitations (*.PRE)	32
09	Structure du fichier Azote (*.AZO)	32
10	Structure d'un fichier Fertilisants (*.FER)	34
11	Structure d'un fichier Caractéristiques d'un pesticide	36
12	Structure d'un fichier Application de pesticides (*.APE)	37
13	Structure d'un fichier Caractéristiques d'une culture (*.CCU)	38
14	Résultats des simulations des flux d'eau	40
15	Résultats de simulation de l'azote nitrique sur le sol	44
16	Résultats de simulation de l'endosulfan	50

Introduction
générale

En Algérie, à la suite de la croissance démographique, du développement industriel et des périodes de sécheresses plus au moins prolongées, les besoins en eau et produits alimentaires sont sans cesse plus grands et leur disponibilité risque de devenir limitée avec le temps en quantité et en qualité.

Devant cette situation qui s'évolue de jours en jours, l'Algérie a consenti des investissements considérables en matière de mise en valeur agricole et d'aménagements hydrauliques en vue de moderniser son agriculture et assurer en conséquence son autosuffisance alimentaire.

De nombreuses zones agricoles ont été en effet développées à l'échelle régionale dont l'augmentation de la productivité agricole à l'hectare n'aurait pas été possible sans la généralisation de l'emploi des engrais et pesticides.

Le périmètre irrigué de Guelma depuis sa mise en service en 1996, la problématique liée à la qualité des eaux d'irrigation à partir de l'Oued Seybouse et l'utilisation abusive des fertilisants et pesticides est posée. Certes, cette intensification a un effet positif sur les rendements agricoles, mais elle présente cependant des incidences négatives en matière de dégradation de la qualité aussi bien des sols que d'autres milieux récepteurs, notamment les eaux de surfaces et souterraines.

Tous les points d'eau (forages, puits et sources) sont implantés au sein même du périmètre irrigué de Guelma et constituent la source principale en eau potable pour les habitants de la ville de Guelma. Les fertilisants et pesticides peuvent être soumis à des phénomènes de transport et atteindre les eaux de surfaces et par la suite les eaux souterraines. En général, plusieurs facteurs conditionnent son transfert en profondeur dont les propriétés du sol, de la molécule, ainsi que les conditions climatiques. Des analyses récentes d'eau souterraine et de sol révélaient la présence de pesticides et fertilisants.

La contamination des eaux superficielles et souterraines par les pratiques agricoles est devenue un problème auquel les gestionnaires de ces ressources sont de plus en plus confrontés. Devant cette situation qui s'évolue sans cesse, les modèles simulant le transport des fertilisant, des pesticides et de leurs dérivés dans le sol et à sa surface sont des outils d'intervention privilégiés et efficaces et peuvent fournir une évaluation globale des risques potentiels de contamination. En comparaison avec la contamination par les fertilisants, la

contamination par les pesticides présente des difficultés additionnelles en raison de l'adsorption des pesticides sur la matière organique et sur la matrice du sol

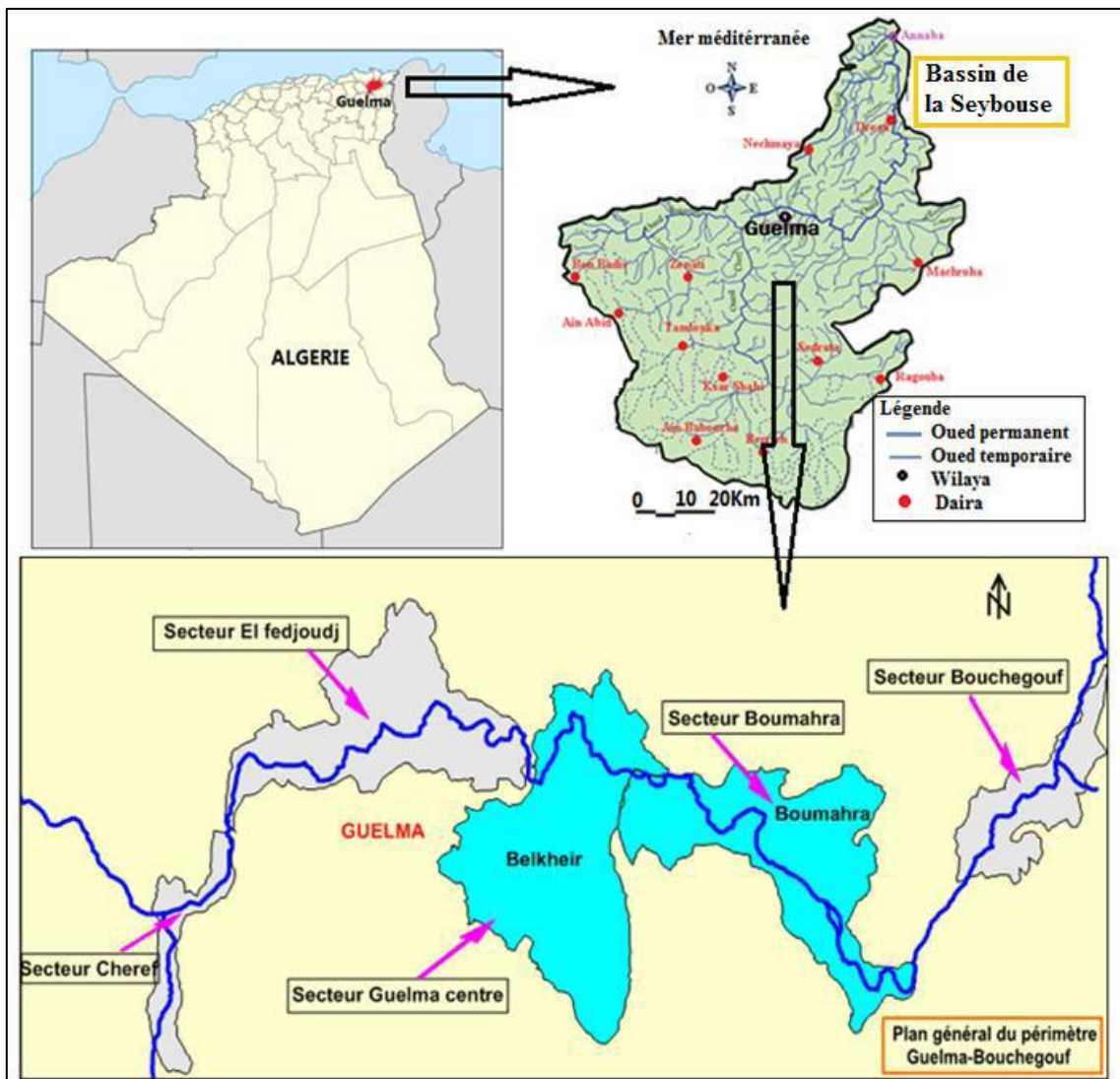
L'objectif global de ce travail est tout d'abord la maîtrise du logiciel AgriFlux2.0, qui est conçu pour simuler les flux d'eau ainsi que les fertilisants et des pesticides dans la zone non saturée du sol et son application dans le périmètre irrigué de Guelma afin de pouvoir minimiser les risques de contamination.

Chapitre I.
Présentation
de la zone
d'étude

1. Situation géographique

La région de Guelma dont fait partie la zone étudiée est située au Nord-Est algérien avec une superficie de 3 686,84 km², reliant le littoral des Wilaya de Annaba, EI Tarf et Skikda, aux régions intérieures telles que les Wilaya de Constantine, Oum EI Bouagui et Souk Ahras. Elle appartient au sous bassin de la Seybouse.

Le secteur d'étude Guelma-Boumahra appartient à la nappe alluviale de Guelma, partie intégrante du bassin de l'Oued Seybouse qui fait partie de la moyenne Seybouse. Il se situe au cœur d'une grande région à activité agricole intense à 227 m d'altitude moyenne (fig.1).



2. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique du bassin de Guelma est constitué par le seul cours d'eau important, qui est l'Oued Seybouse. Il prend naissance des plaines semi-arides et résulte de la confluence de deux Oueds qui sont le Charef et Bouhamdane au niveau de Medjez Ammar et se termine à l'embouchure de la mer Méditerranée au Nord près de la commune de Sidi Salem, wilaya d'Annaba, après un parcours de 160 Km. Il est considéré comme un collecteur des eaux de ruissellement qui affluent sur ses deux rives : Oued Skhoun, Oued Maiz et Oued Zimba (fig.2).

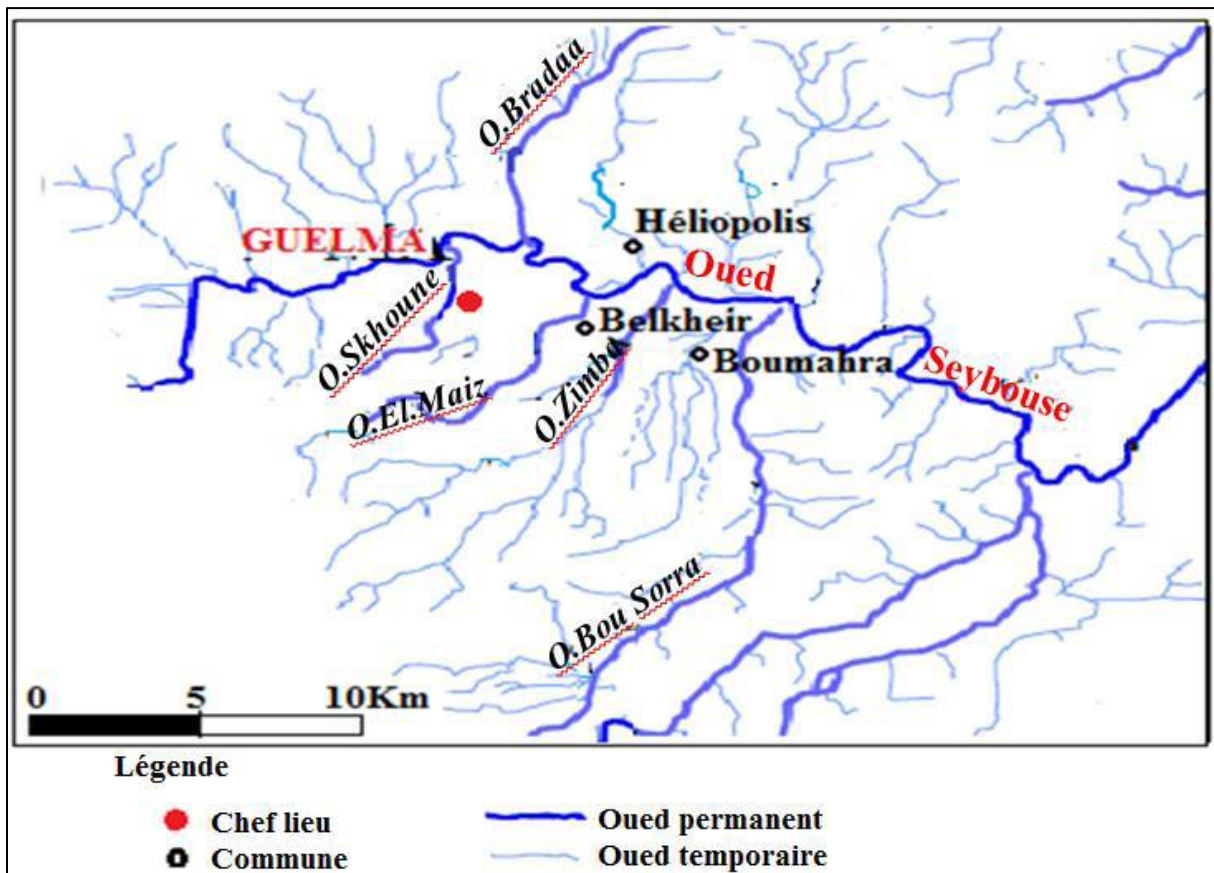


Figure 2. Le réseau hydrographique du bassin de Guelma (In Kachi N).

3. Caractérisation géologique

La Région de Guelma a fait l'objet de plusieurs études géologiques, dont celle de J. Darest de la Chavanne (1910), J.F. Raoult (1973), J.M.Vila (1968-1980), Durant Delga (1968) et J.C. Lahondere (1981-1983) qui constituent les références de base utilisées dans la synthèse géologique du Nord-Est Algérien (fig.3).

La géologie de la région de Guelma est caractérisée par des formations géologiques appartenant aux différents âges allant du Quaternaire au Trias, présentant ainsi une lithologie très variée qui comprend essentiellement: les alluvions (sable, gravier, cailloutis,...), les grés, les marnes, les argiles, et les calcaires.

Les différentes phases tectoniques ont joués un rôle prépondérant dans la morphogenèse de la région, donnant naissance à une dépression qui forme le réservoir aquifère de la vallée de Guelma, remplie par des alluvions d'âge Mio-plio- quaternaire. Ce remplissage constitue l'ancienne et l'actuelle terrasse de la vallée de la Seybouse.

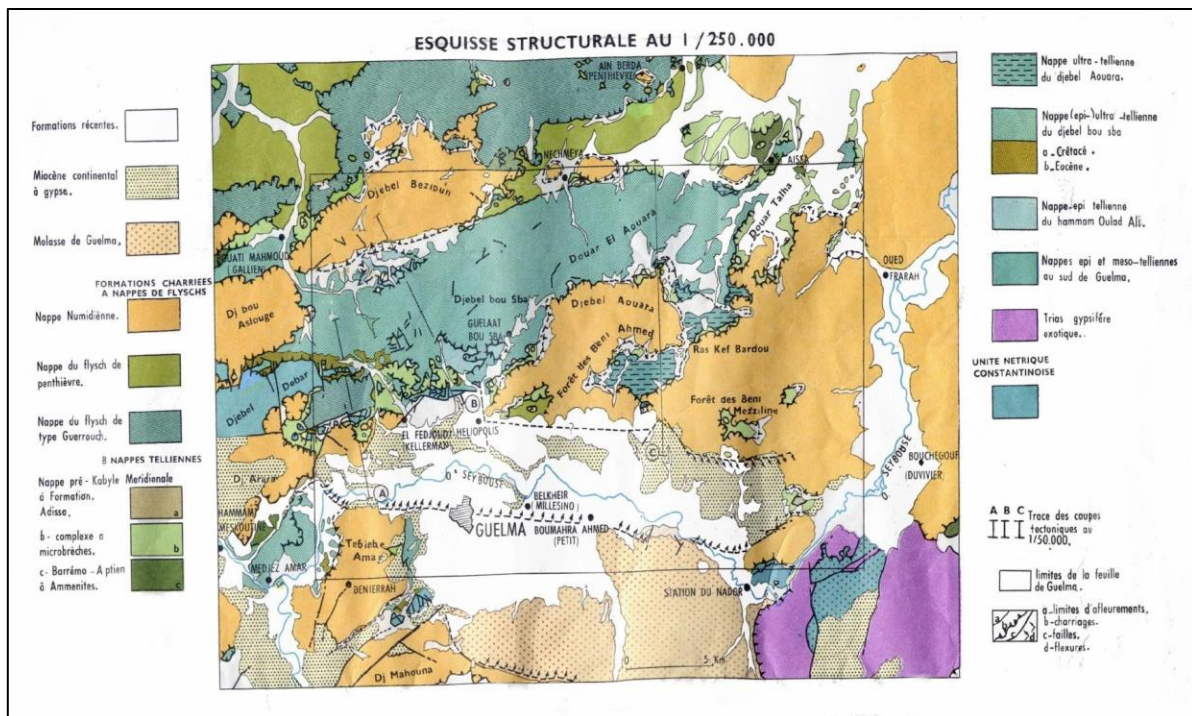


Figure 3. Carte structurale de la région de Guelma, extraite de la carte géologique (JM.Vila, 1988)

4. Caractérisation climatique

Caractérisation du climat de la région de Guelma Guelma, ville du Nord-Est algérien, se situe entre 36°27' de latitude Nord et 7°28' de longitude Est (Tab.1). Elle occupe une position médiane entre le Nord, les hauts plateaux et le Sud du pays.

Dans le cadre de cette étude, 28 années hydrologiques ont été choisies (1985- 2013), pour pouvoir utiliser le maximum des données plus récentes afin d'interpréter les paramètres climatiques mesurés au niveau de la station météorologique de Belkheir (ONM) située à

Belkheir, distante de 4 km de la ville de Guelma, choisie comme station de référence située à l'intérieur du Bassin versant.

Tableau 1. Les caractéristiques et situations topographiques de la station pluviométrique de Guelma.

Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période d'observation	Appareil
Guelma	07°28'44,91" E	36° 27'23,75" N	215	1985 à 2013	Pluv Ass

4.1. Diagramme pluviothermique de Gaussen (P = 2T)

Un diagramme pluviothermique est un type particulier de diagramme climatique représentant les variations mensuelles sur une année des températures et des précipitations selon des gradations standardisées : une gradation de l'échelle des précipitations correspond à deux gradations de l'échelle des températures (P = 2T).

Le diagramme pluviothermique de Gaussen permet de calculer la durée de la saison sèche. Il tient compte de la pluviosité moyenne mensuelle et la température moyenne mensuelle qui sont portées sur des axes où l'échelle de la pluviosité est double de la température (1°C = 2mm).

Si $P < 2T$: mois sec

Si $P > 2T$: mois humide

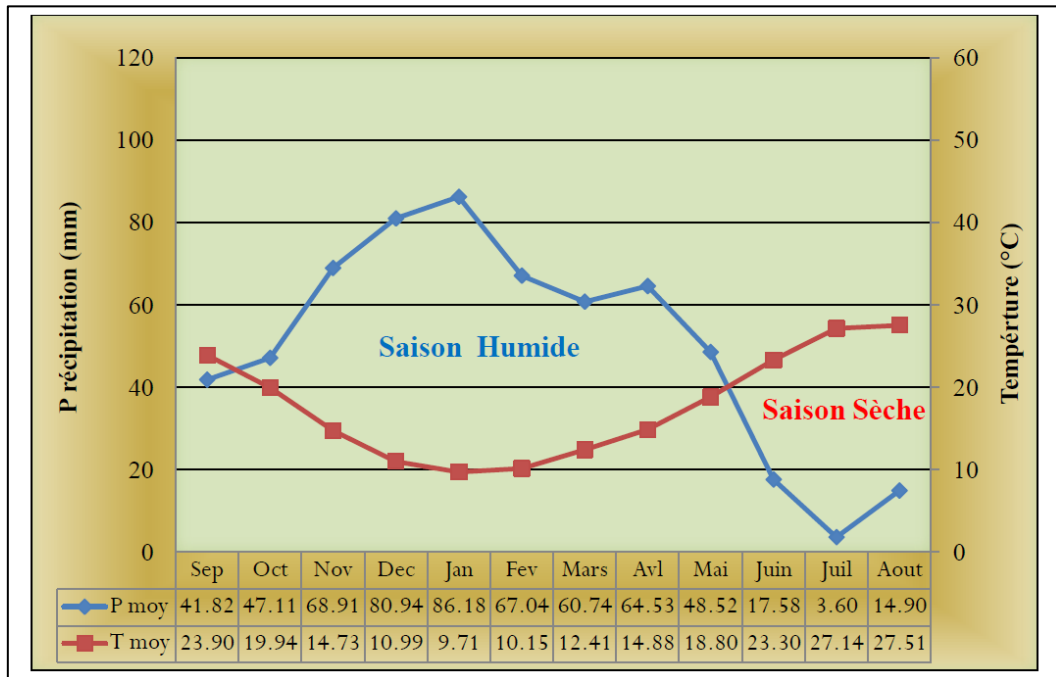


Figure 4. Diagramme pluviothermique à la station de Belkheir (In Kachi N).

Le diagramme pluviothermique établi (fig.4) montre l'existence de deux saisons bien distinctes:

- Une saison estivale sèche et chaude qui s'étale du mois de Juin (23.30°C), jusqu'à septembre (23.90°C). Cette saison n'excède pas quatre mois.
- Une saison hivernale humide plus longue qui dure environ sept mois débutant de octobre jusqu'au mois de Mai. Durant cette période, la pluviométrie connaît deux épisodes pluvieuses ; au mois de décembre (80.94mm) et le mois de janvier (86.18 mm).

4.2. Etude des paramètres climatiques

Les facteurs climatiques dans leur ensemble permettent d'expliquer quantitativement l'intensité et la variabilité des composantes du régime hydrologique, dans le temps et dans le l'espace, en interaction avec les conditions physico-géographiques de l'écoulement (S. Affoun, 2005).

4.2.1. Les précipitations :

Les précipitations permettent la constitution d'un stock d'eau qui va être soumis à plusieurs processus de « vidange » et particulièrement les processus d'évapotranspiration, de ruissellement de surface et de pertes par infiltration (A. Chaponnière, 2005).

Pour cela toute étude climatologique nécessite une analyse détaillée de ce paramètre, du fait que la pluie est un facteur qui conditionne l'écoulement saisonnier et par conséquent le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes

a) Variation moyennes mensuelles interannuelles des précipitations

La courbe de variation des précipitations mensuelles sur une période de 28 ans allant de 1985 à 2013 (fig.5) montre que :

- 1) Le mois le plus arrosé est le mois de janvier avec une précipitation moyenne mensuelle de 86.18 mm ;
- 2) Le mois moins arrosé est le mois de juillet avec une précipitation moyenne mensuelle de 3.60 mm ;
- 3) La hauteur moyenne mensuelle est de 50.16 mm

b) Variations interannuelles des précipitations

L'analyse de la courbe des variations interannuelles des précipitations sur une période de 28 ans (1985-2013) montre une grande différence entre l'année la plus arrosée (2002/2003) avec une précipitation de 879 mm et l'année la plus sèche (1996-1997) avec une précipitation de 291 mm (fig.6). La précipitation moyenne annuelle est de l'ordre de 601.89 mm.

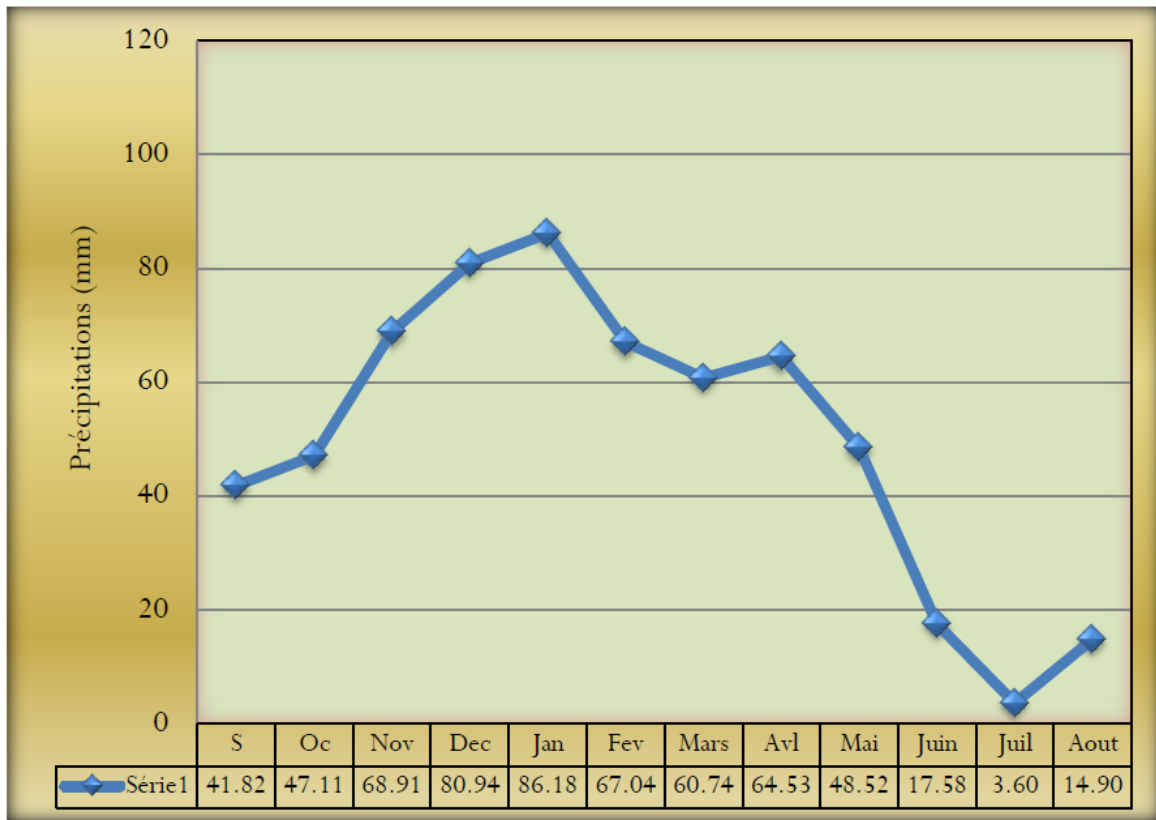


Figure 5. Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles à la station de Guelma (1985-2013) (In Kachi N).

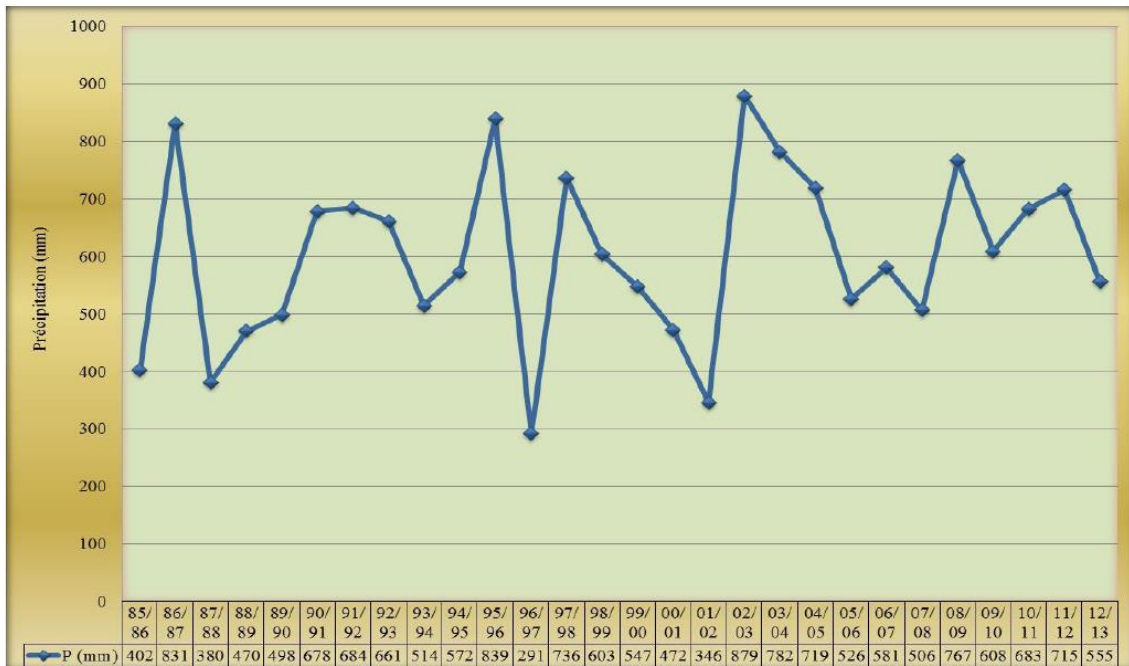


Figure 6. Variation interannuelle des précipitations à la station de Guelma (1985-2013) (In Kachi N).

4.2.2. Température

La température de l'air est un paramètre ayant une grande influence sur le bilan hydrologique, elle agit directement avec les autres facteurs météorologiques (précipitation, insolation, etc....) sur le climat d'une région. C'est par ces mesures qu'on essaye de montrer le rôle important de l'évapotranspiration sur l'écoulement, et de déterminer les saisons thermiques.

a) Variation des températures moyennes mensuelles :

A partir des données enregistrées à la station de Guelma, la courbe représentative des variations de températures moyennes mensuelles sur une période de 28 années (1985-2013) montre deux saisons thermiques (fig.7) :

- L'une chaude, caractérisée par des moyennes mensuelles maximales enregistrées aux mois de juillet et d'août, avec respectivement une température de l'ordre de 29.7°C et 30.6°C.
- L'autre froide, caractérisée par des moyennes mensuelles minimales enregistrées aux mois de décembre, janvier et février, avec une température de l'ordre de 7.3°C et 7.9°C.
- La moyenne mensuelle est de 17.79°C.

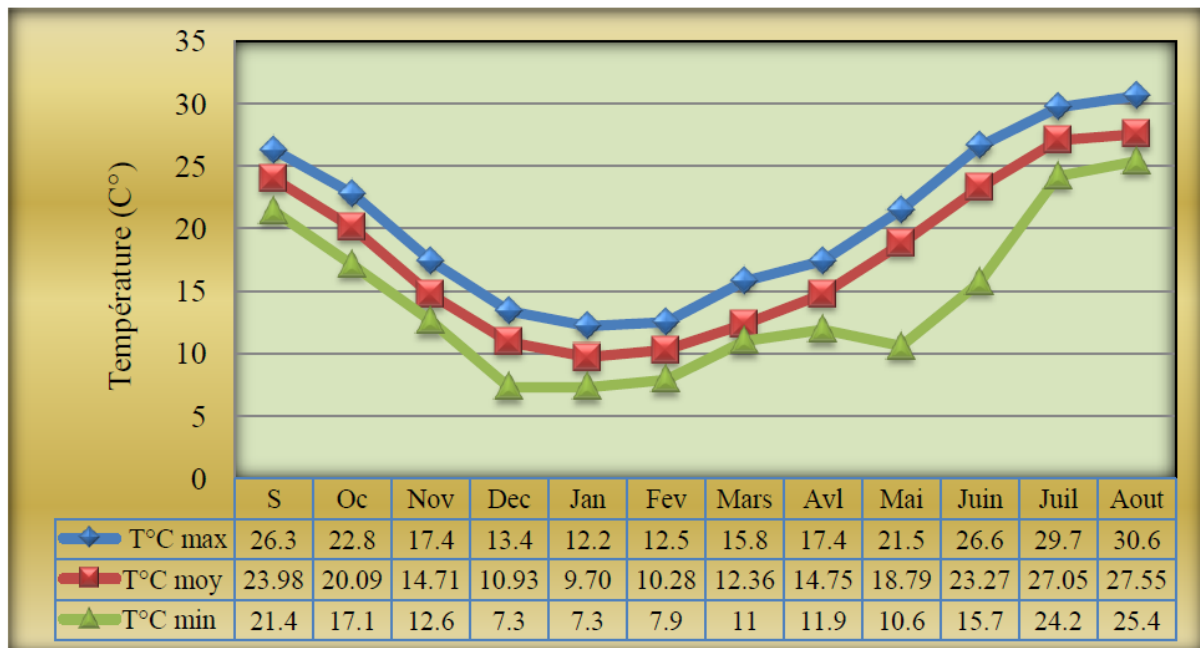


Figure 7. Variation des températures moyennes mensuelles à la station de Guelma (1985-2013) (In Kachi N).

b) Variation des températures moyennes annuelles

L'analyse des valeurs des Variations interannuelles des températures observées sur une période de 28 ans pour la station de Guelma montre que l'année la plus chaude est l'année

1993-1994 avec une moyenne de 18.84°C, et l'année la plus froide est l'année 1991-1992, avec une moyenne de 16.43°C. Signalons que la température moyenne interannuelle est de l'ordre de 17.79°C (fig.8).

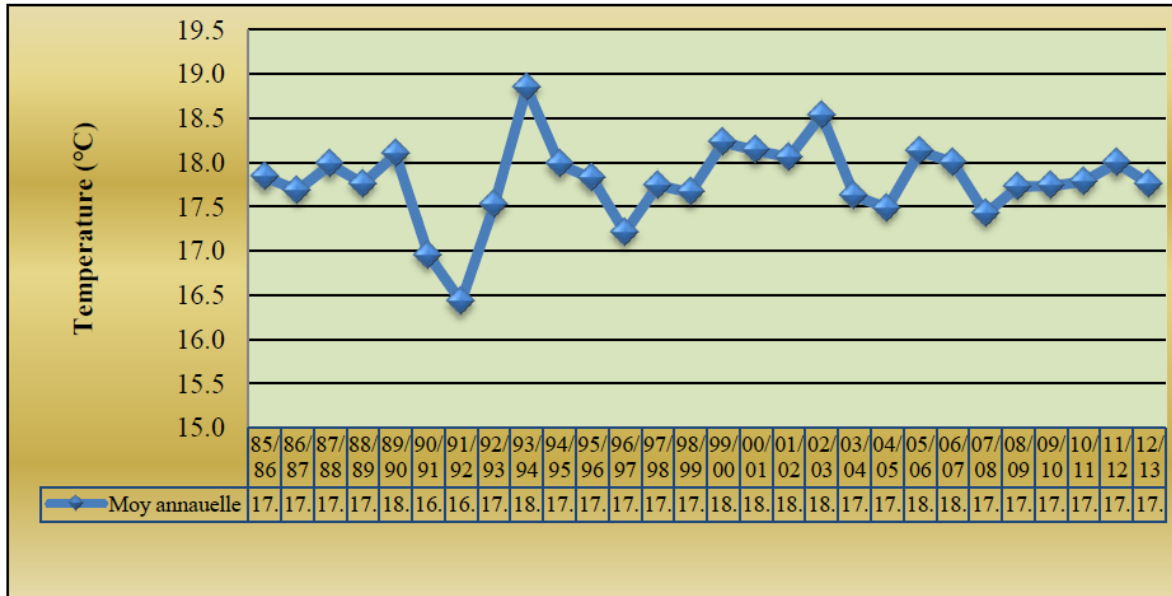


Figure 8. Evolution des températures moyennes annuelles à la station de Guelma (1985-2013) (In Kachi N).

4.3. Bilan hydrique

Le bilan hydrique est établi pour un lieu et une période donnés par comparaison entre les apports et les pertes en eau dans ce lieu et pour cette période. Les apports d'eau sont effectués par les précipitations. Les pertes sont essentiellement dues à la combinaison de l'évaporation et la transpiration, que l'on désigne sous le terme d'évapotranspiration.

Le bilan hydrique englobe l'étude des paramètres suivants :

- L'évapotranspiration.
- Les écoulements de surface ou ruissellement.
- L'infiltration.

Le bilan hydrique établi pour la zone d'étude sur une période de 28 années (1985-2013)

(Tab.2) et (fig.9) révèlent les constatations suivantes :

- Une période déficitaire qui s'étend de juin à octobre et se caractérise par :
 - Un déficit agricole de DA= 461.3mm
 - Une absence d'alimentation du stock (RFU = 0)
 - Une forte évapotranspiration potentielle mensuelle qui atteint 171.4 mm

- Une température élevée de l'ordre de 27.51 °C.

➤ Une autre période excédentaire caractérisée par :

- Une pluviométrie importante qui atteint 86.18mm au mois de janvier,

- Faibles température et évapotranspiration ;

- Une recharge du stock, où la RFU (réserve facilement utilisable) commence à se reconstituer à partir du mois de novembre pour atteindre son maximum (100 mm) de janvier à avril, période pendant laquelle il y a un excédent d'eau qui va contribuer à l'alimentation de la nappe aquifère.

Tableau 2. Bilan hydrique à la station de Guelma (1985-2013) selon la méthode de Thornthwaite

Mois	Ip	IT	CL	ETP	Pr	BH	CH	VR	RFU	ETR	Def	Exc
Sep	23.9	10.7	1.03	112.2	41.8	-70.4	-0.6	0.0	0.0	41.8	70.4	0.0
Oct	19.94	8.1	0.97	75.2	47.11	-28.1	-0.4	0.0	0.0	47.1	28.1	0.0
Nov	14.73	5.1	0.86	37.8	68.91	31.1	0.8	31.1	31.1	37.8	0.0	0.0
Dec	10.99	3.3	0.81	20.6	80.94	60.4	2.9	60.4	91.5	20.6	0.0	0.0
Jan	9.71	2.7	0.87	17.5	86.18	68.7	3.9	8.5	100.0	17.5	0.0	60.2
Fev	10.15	2.9	0.85	18.6	67.04	48.5	2.6	0.0	100.0	18.6	0.0	48.5
Mar	12.41	4.0	1.03	32.8	60.74	27.9	0.9	0.0	100.0	32.8	0.0	27.9
Avr	14.88	5.2	1.10	49.3	64.53	15.3	0.3	0.0	100.0	49.3	0.0	15.3
Mai	18.8	7.4	1.21	84.0	48.52	-35.5	-0.4	-35.5	64.5	84.0	0.0	0.0
Juin	23.3	10.3	1.22	126.7	17.58	-109.1	-0.9	-64.5	0.0	82.1	44.6	0.0
Juill	27.14	12.9	1.24	171.4	3.6	-167.8	-1.0	0.0	0.0	3.6	167.8	0.0
Aout	27.51	13.2	1.16	164.5	14	-150.5	-0.9	0.0	0.0	14.0	150.5	0.0
Annuel	17.8	85.9	----	910.5	601.0	-309.5	----	----	----	449.2	461.3	151.8

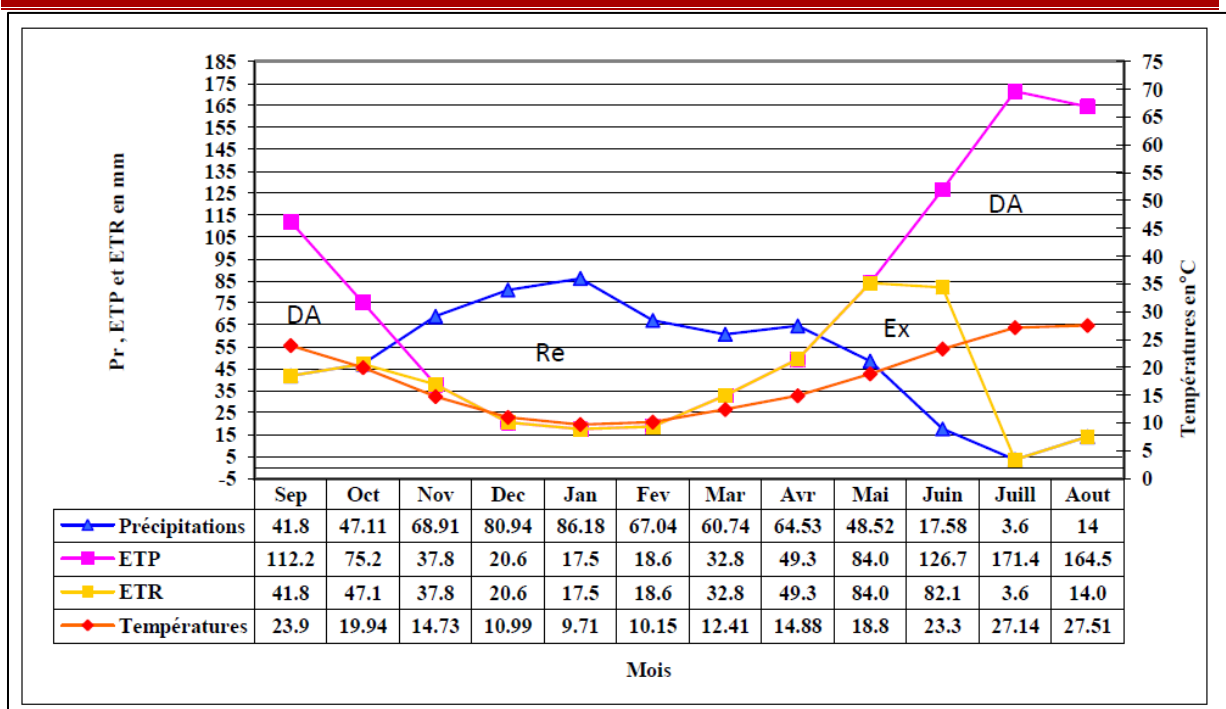


Figure 9. Représentation graphique des paramètres du bilan hydrologique (In Kachi N).

5. Caractérisations hydrogéologiques

Le bassin de Guelma présente plusieurs ensembles lithologiques qui impliquent des zones hydrogéologiques différentes. Au Sud, un matériel permettant une importante accumulation en eau souterraine mais fracturée ce qui favorise l'infiltration et défavorise la formation des nappes aquifères. Sur la rive gauche de la Seybouse, on rencontre des formations pour lesquelles l'infiltration se fait très difficilement. Enfin, au centre, les alluvions quaternaires (poudingues, graviers, galets, limons,...) à forte perméabilité renferment une nappe très importante (fig.10).

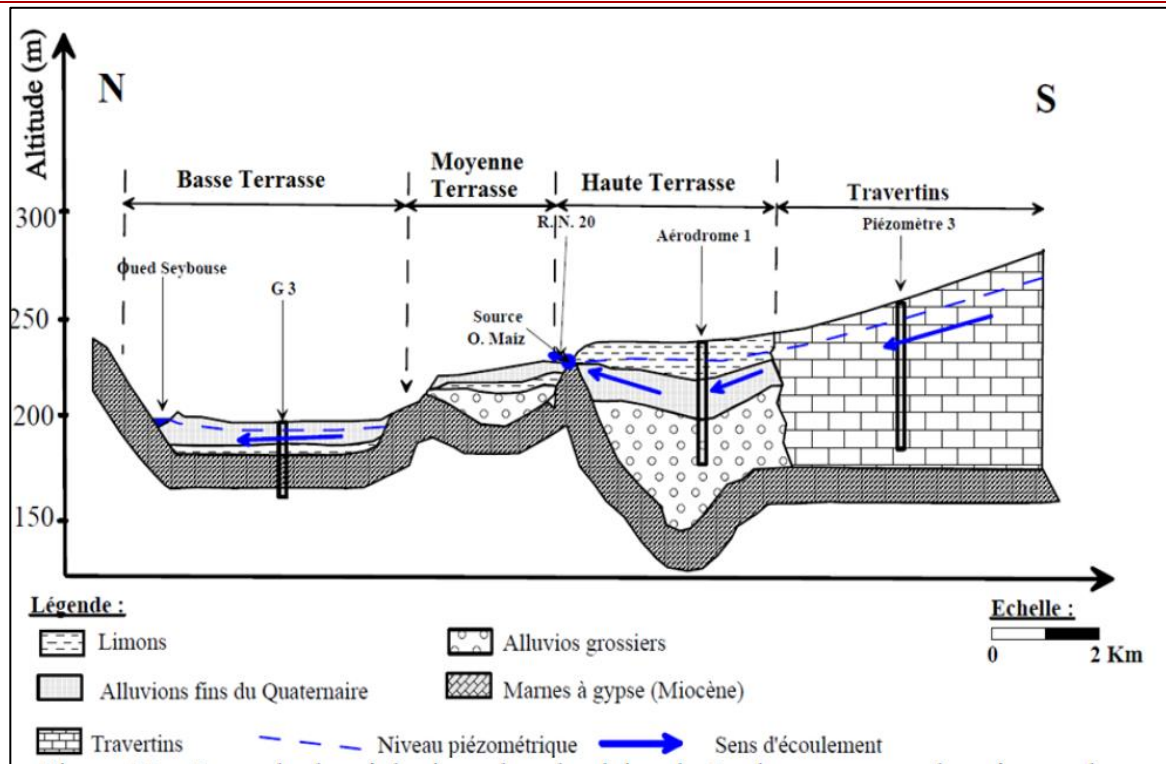


Figure 10. Coupe hydrogéologique dans la plaine de Guelma, montrant la présence des aquifères (alluvionnaire et fissuré) et la relation alluvions travertins (B.Gaud, 1974)

La coupe hydrogéologique (fig.10), localisée à l'Est de la ville de Belkheir, d'orientation Nord-Sud montre la liaison entre la basse terrasse et la nappe de la haute terrasse qui se fait par la moyenne terrasse. Cette coupe, se caractérise par :

- Des alluvions grossières des basses terrasses sont plus épaisses par rapport à celles des moyennes terrasses (15 m environ).
- Des alluvions fines, dominent dans les moyennes terrasses avec une intercalation de niveaux argileux.
- Le remplissage alluvionnaire est très important dans les hautes terrasses de 100 m d'épaisseur en moyenne. Ce sont des dépôts Plio-quaternaire grossiers.
- Au Sud ces calcaires travertineux du pliocène sont en contact direct avec les alluvions des hautes terrasses qui les alimentent en partie.
- Le substratum est toujours le même, des marnes à gypse du Miocène.
- La direction principale d'écoulement des eaux souterraines se fait du Sud au Nord.

6. Présentation du périmètre irrigué de Guelma

Le périmètre d'irrigation de la plaine de Guelma-Boucheougouf, s'étend sur 80 Km environ du confluent de l'Oued Bouhamdane et de l'Oued Cherf qui donne naissance à l'Oued Seybouse à partir de la plaine de Guelma jusqu'à la plaine de Boucheougouf, avec une superficie totale à équiper de 9.940 ha et irrigable de 9.250 ha (O.N.I.D, 2010).

Il est subdivisé en 05 secteurs opérationnels indépendants l'un de l'autre du point de vue desserte en eau (fig.11).

- Secteur Guelma centre : a été mis en exploitation en 1996
- Secteur Boumahra Ahmed : mis en exploitation en 2001
- Secteur El Fedjoudj : mis en exploitation en 2004
- Secteur Cherf : mis en exploitation en 2000
- Secteur Boucheougouf : mis en exploitation en 2001(O.N.I.D, Guelma).

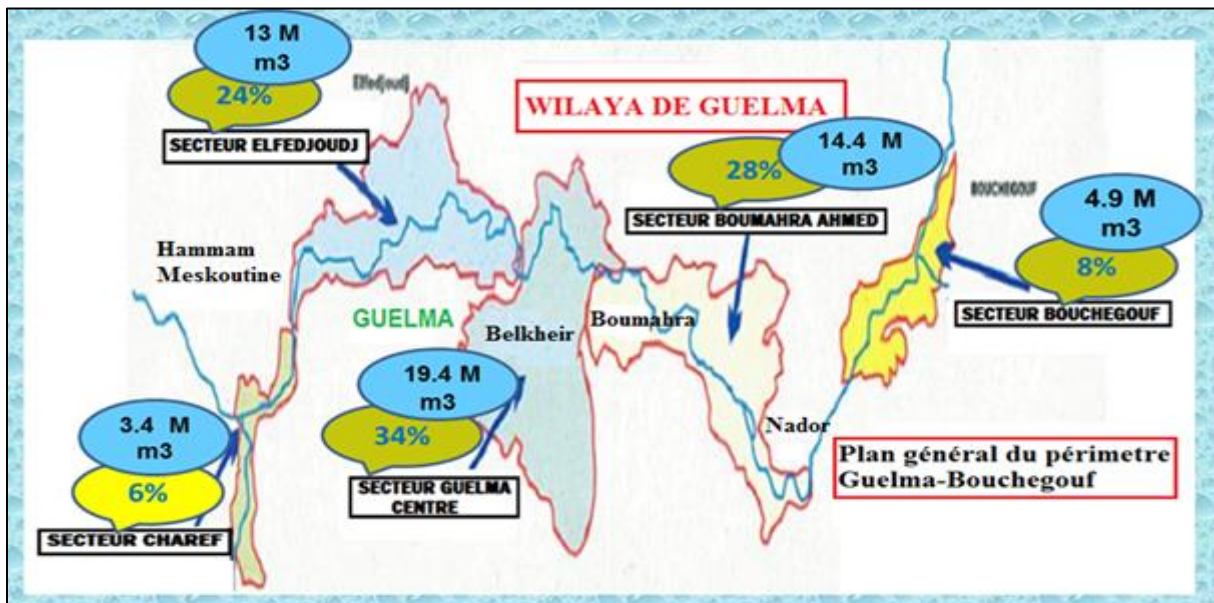


Figure 11. Présentation du périmètre irrigué de Guelma-Boucheougouf (In Kachi N).

6.1. Volume annuel d'eau pompé de l'Oued Seybouse

La distribution des eaux pompées de l'Oued Seybouse pour l'irrigation du périmètre a commencé progressivement avec 2.4 hm³ à partir de l'année 1996, l'année de mise en exploitation du secteur de Guelma-centre.

De l'année 2002 une augmentation du volume affecté à l'irrigation a été enregistrée (23.4 hm³), pour atteindre une valeur maximale de 26.84hm³ en 2011 (fig. 12 et 13).

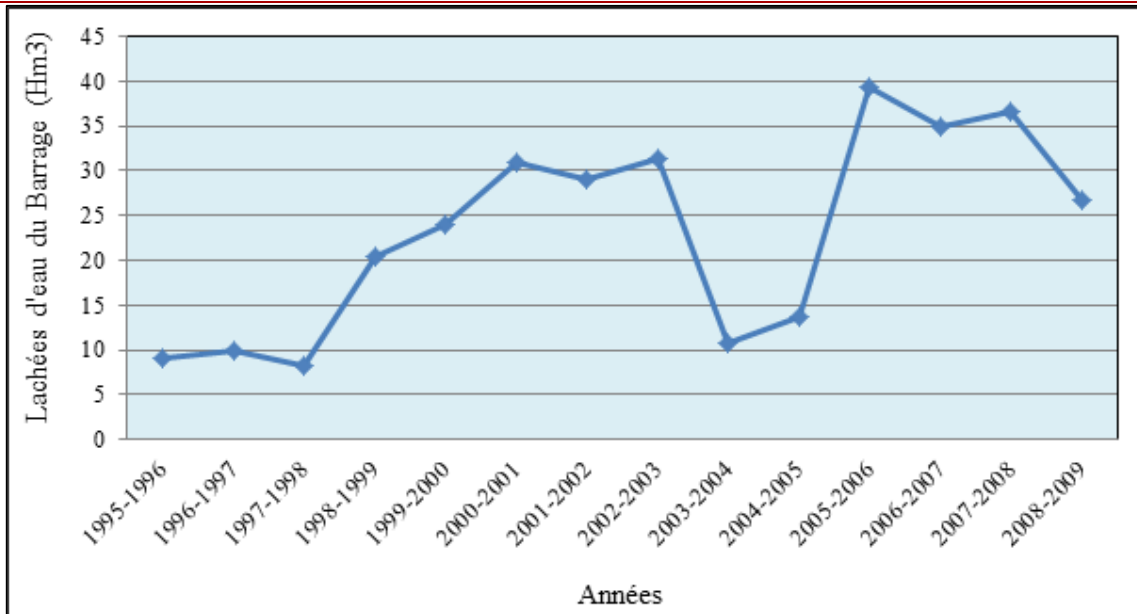


Figure 12. Volumes affectés à l'irrigation à partir du barrage de Hammam Debagh (source O.N.I.D, mai 2012).

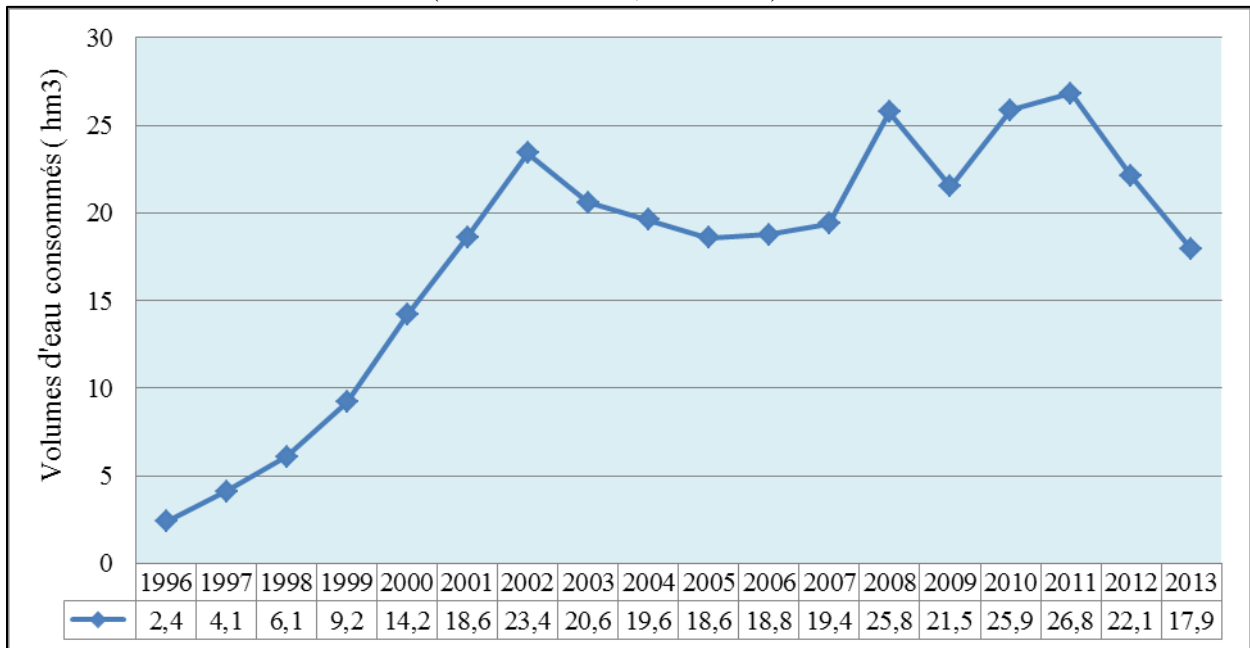


Figure 13. Evolution des volumes d'eau consommés par année dans le périmètre de Guelma-Boucheouf (d'après O.N.I.D. 2013)

6.2. Les sols du périmètre

Le sol est la formation naturelle de surface à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, climatiques et biologiques.

Il est mentionné dans le territoire du secteur irrigué de Guelma-Boumahra trois catégories de sols (Djeraba, 1973) :

- Peu évolués d'origine non climatique, d'apport alluvial ;
- Vertisols à drainage externe, de structure argileuse sur au moins les 15 cm supérieurs. Les plus répandus du territoire à cultures diversifiées.
- Calcimagnésiques, bruns calciques vertiques.

6.3. Types de cultures

Allant de l'année 2010 à 2013, la superficie réservée aux différents types de culture au niveau du périmètre existant de 6167 ha, variée entre 250 à 650 ha pour les cultures maraichères, 160 à 390 ha pour la pomme de terre et de 556 à 765 ha pour les céréales, par contre l'arboriculture connaît une évolution presque constante et varie entre 72 et 77 ha dans la même période. En 2014, une nette augmentation de la superficie réservée à ces cultures (ont triplées), liée à l'augmentation des besoins en ses produits alimentaires. Les céréales occupent la première place par rapport aux pommes de terre et les arboricultures avec une superficie de 3127 ha et prend une place stratégique dans le système alimentaire du périmètre irrigué (fig.14).

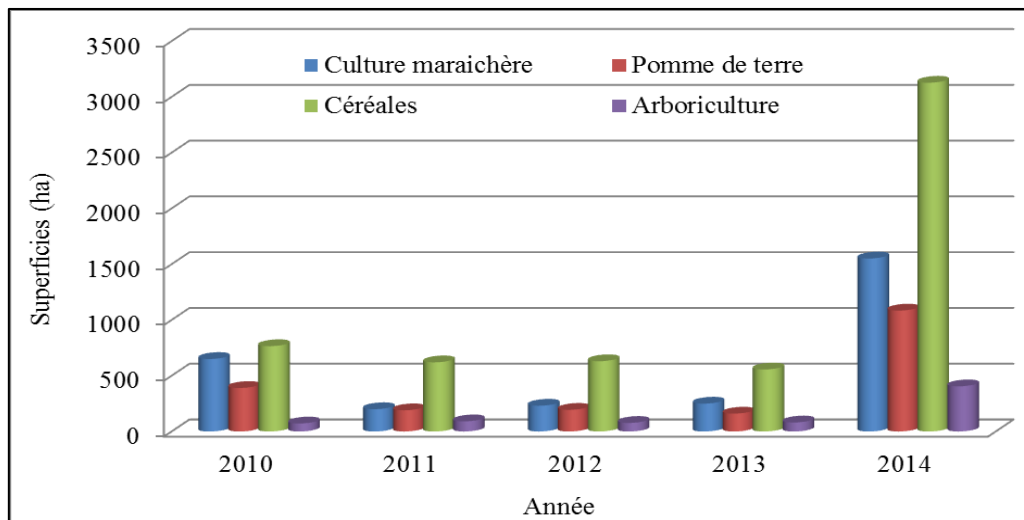


Figure 14. Répartition des superficies en extension par type de culture/année (In Kachi N).

Le graphe ci-dessous mis (fig.15) en évidence l'évolution de la production des tomates industrielles et pommes de terre au sein du périmètre irrigué de Guelma durant 28 ans allant de 1985 à 2013. L'analyse des données, nous montre que de l'année 1985 à 2007, l'évolution de la production de la tomate industrielle est sensiblement identique à celle de la pomme de terre, mais à partir de l'année 2007-2008 jusqu'au 2012-2013 la production a pris une augmentation en flèche où une récolte satisfaisante de 2 millions de quintaux de tomate industrielle, a été enregistrée en mai 2013, sur une superficie de 3.000 ha ,qui a doublée celle de la pomme de terre (1M de Qx/an), liée à la construction en place des trois usines de transformation de tomates : Ben Omar, Belabid et conserverie du Sud.

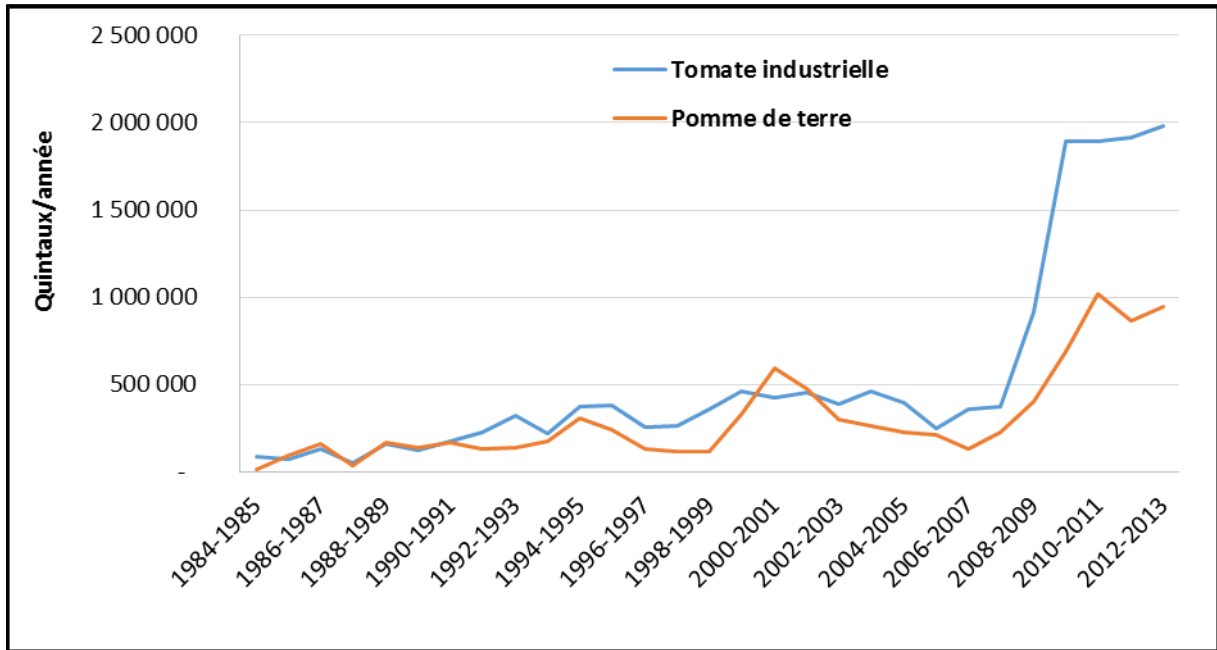


Figure 15. Evolution de la production agricole des tomates industrielles et pommes de terre (1985 à 2013) dans le périmètre irrigué de Guelma(ONID)

Chapitre II.
Pollution des
eaux

Introduction

La qualité des eaux dépend en partie des eaux de pluie (dans l'atmosphère) et essentiellement des interactions géochimiques et biologiques dans le sol et dans la nappe. Le rôle du sol est généralement majeur dans l'acquisition des caractères chimiques des eaux souterraines, en particulier du fait de la présence de certains paramètres (polluants ou non) qui le composent.

Les interactions eau-roche se traduisent par la mise en solution des formations géologiques par la précipitation de substances contenues dans la roche. Les eaux transitant à travers des formations différentes ont donc naturellement une composition chimique différente.

La composition chimique ainsi acquise, au sol, est d'origine multiple : naturelle, domestique, urbaine, industrielle et agricole. Tout en distinguant les polluants miscibles des non-miscibles, on les classe en polluants physiques, chimiques et biologiques.

- ✓ Polluants physiques : température, gaz, suspension, radioactivité
- ✓ Polluants chimiques : substances sous forme minérale ou organique, ils peuvent être: dissous (sels, hydrocarbure) mélangés (alcools) émulsés (graisse sur détergents) en phase séparée (produits pétroliers)
- ✓ Polluants biologiques : germes et virus

Les processus de pollution sont extrêmement variés, que ce soit par les rejets urbains, industriels et agricoles contenant des produits toxiques ou indésirables. D'autre part, la surexploitation actuelle des nappes d'eau peut mettre en mouvement rapide des eaux polluées, précédemment stabilisées en régime d'écoulement naturel.

1. Types de pollution :

Il existe plusieurs sortes de pollution très différentes les unes des autres par leurs origines et par leurs conséquences sur la contamination des sols et des eaux. Seuls les polluants d'origine agricole sont exposés.

1.1. Agricole

Par les pratiques agricoles souvent intensives, et par l'utilisation excessive de produits chimiques fertilisants (engrais et pesticides) dans le cadre de l'exploitation intensive de parcelles et pour protéger ou stimuler la croissance agricole, ces produits, finissent par s'accumuler dans les sols, s'infiltrer dans les nappes phréatiques ou dans les cours d'eau par ruissellement.

Le périmètre irrigué de Guelma a eu des effets socio-économiques positifs sur les agriculteurs en améliorant la production agricole dans la région. Malheureusement, la hausse de productivité des terres de culture s'accompagne de sérieux problèmes environnementaux dus, à une pratique agricole mal maîtrisée par les agriculteurs (apport de fertilisants et des produits agro-chimiques) qui conduit à la dégradation du milieu récepteur, en particulier les eaux de surfaces et souterraines.

Les Engrais Inorganiques (également appelés engrais minéraux et chimiques) proviennent essentiellement de sources non vivantes au travers de processus artificiels. La plupart des engrais commerciaux entre dans cette catégorie (Tab.3).

Tableau 3. Fonctions des éléments primaires (N P K).
(Source : adaptée du manuel de statistiques des Engrais de la FAO,

Nom	Avantages	Symptômes de carences
Azote (N)	Donne la couleur verte aux plantes, accroît la croissance et assure de meilleurs rendements	Feuilles vertes pâles ou jaunes et les plantes sont en retard de croissance.
Phosphate (P)	Donne une jeune plante forte, crée des racines saines, améliore la qualité globale de la plante et conduit à une maturité précoce des cultures.	Vieilles feuilles de couleur pourpre, Lente maturité des fruits, faible développement des semences et les plants sont en retard de croissance..
Potassium (K)	Produit de bons fruits et de bonnes semences, contribue à la santé générale des plantes, rend les plantes résistantes aux maladies et soutient l'absorption d'eau par les plantes.	Des feuilles vert foncé sont le premier signe. Tiges faibles. Plus tard, les feuilles deviennent marron foncé avec un dépérissement des tissus.

2. Rétention et transformation des produits phytosanitaires dans le sol

2.1. Processus de rétention

Dès son application puis pendant son mouvement à travers la zone non saturée du sol, le pesticide se retrouve en contact avec la phase solide du milieu poreux avec laquelle il interagit. Le terme de "rétention" englobe l'ensemble des phénomènes qui font passer les

molécules pesticides dans la phase solide ; l'adsorption, plus précisément, étant le processus qui régule la rétention.

2.1.1 Phénomènes d'adsorption/désorption

2.1.1.1 L'adsorption

Le phénomène d'adsorption est caractérisé par l'accumulation à la surface d'un solide (sol) de molécules (pesticides), ionisées ou non. Il y a donc lieu à la surface de séparation (interface) de deux phases :

- (1) une phase solide constituée par des particules d'argiles et de Matière Organique (MO) dans le cas du sol,
- (2) et une phase liquide (la solution du sol) dans laquelle se trouvent des molécules pesticides soit en solution soit en suspension.

2.1.1.2 Désorption

Le phénomène inverse de l'adsorption est appelé la **désorption**. Il décrit la libération dans la phase fluide (liquide ou gazeuse) du sol, de molécules préalablement adsorbées. La caractérisation du phénomène de désorption est utile pour estimer la réversibilité des processus de liaisons.

2.1.1.3 Principaux mécanismes de l'adsorption

Différents types d'interactions interviennent dans l'adsorption d'un composé organique avec un sol, elles sont globalement de nature chimique (**chemi-sorption**) ou physique (**physi-sorption**). Adsorption et désorption sont des termes généraux : ils se rapportent simplement au phénomène de transfert de masse par lequel des molécules quittent la phase fluide pour s'associer avec une phase immobile et vice-versa.

2.1.1.4 Facteurs influant l'adsorption

Les différentes interactions sol/pesticide sont contrôlées par les propriétés à la fois de la molécule et du milieu poreux (composition de la Matière Organique et chimie de la solution) ainsi que par les conditions ambiantes (température et humidité).

2.2. Processus de transformation

Une fois qu'un pesticide a atteint le sol, il est soumis à des phénomènes de transformation d'origine principalement biologique et/ou chimique dont l'intensité est contrôlée par ses propriétés physico-chimiques, les caractéristiques du sol et les conditions ambiantes.

Les processus majeurs de transformation des pesticides sont la dégradation biochimique (ou biologique) et la dégradation chimique (ou abiotique) qui peuvent agir simultanément.

3. Transport des produits phytosanitaires dans le sol

Les sols sont des milieux poreux structurés complexes qui se caractérisent par une grande diversité de taille de pores (allant du nm au dm). Cette diversité se traduit par une hétérogénéité dans la vitesse porale, qui influence directement le déplacement miscible des solutés.

3.1. Transport de pesticides par l'eau mobile

A l'échelle du profil de sol, le transport de masse des pesticides est provoqué par la percolation de l'eau mobile au travers des pores du sol les plus grossiers (flux macroporal).

Ce lessivage peut être modifié par l'existence de voies d'écoulement rapide dans le sol (flux préférentiel) et par d'autres facteurs du milieu. Parmi ces facteurs, trois dont l'influence serait déterminante : le travail superficiel du sol, la teneur en eau initiale et le moment de l'application du pesticide.

Chapitre III.
Présentation
du logiciel
Agiflux 2

Avertissement à l'utilisateur

L'utilisateur du logiciel AgriFlux2.0 est seul responsable de l'utilisation du logiciel, de ses résultats, de leur interprétation et de leurs conséquences. L'utilisation du logiciel implique que l'utilisateur a lu cet avertissement et y consent de facto. AgriFlux étant mis gratuitement à disposition des potentiels utilisateurs, il est fourni sans aucun service de dépannage ou de renseignement. Dans le cas où les utilisateurs souhaiteraient une collaboration pour son utilisation, ils peuvent prendre contact avec contact@hydriad.com.

1. Présentation et structure du modèle

Agriflux est un modèle unidimensionnel modulaire simulant, à pas de temps journalier, les flux d'eau, ainsi que les transferts d'azote et de produits phytosanitaires dans la zone non saturée du sol (fig.16). De type **mécaniste** et **stochastique**, il est basé sur une représentation physique des processus tout en incorporant la variabilité spatiale des paramètres. Agriflux requiert des paramètres disponibles ou facilement mesurables et permet d'attribuer une distribution statistique à chacun des paramètres via la méthode Monte Carlo.

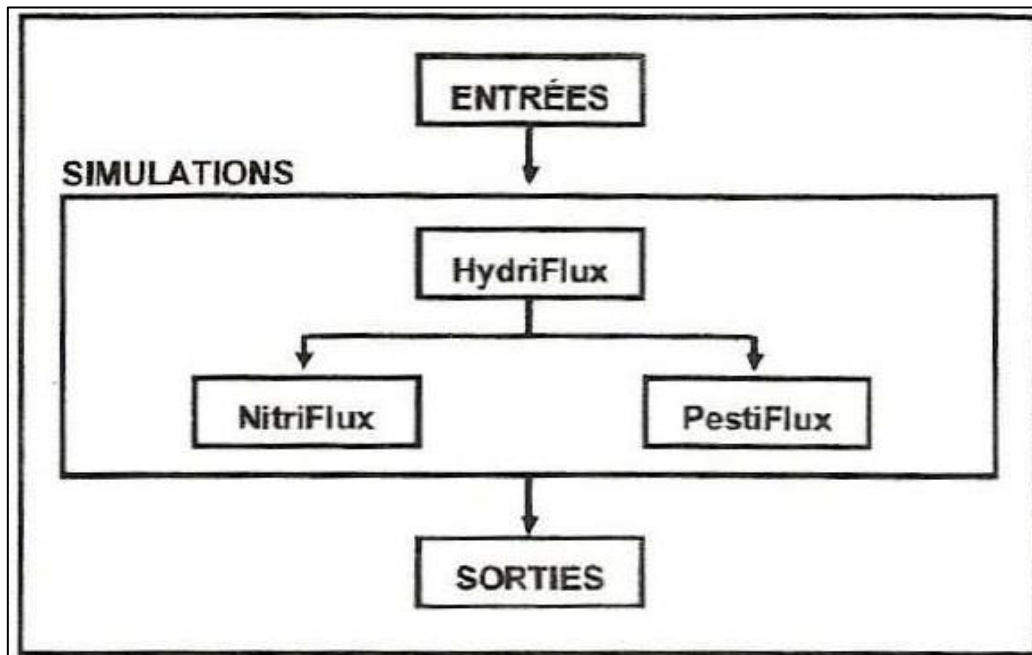


Figure 16. Le modèle Agriflux 2.0 (Manuel d'utilisateur Agriflux 2.0)

Agriflux se compose de trois modules principaux:

(1) **Hydriflux**, qui simule le cycle de l'eau (précipitations, ruissellement, infiltration, prélèvement d'eau par la culture, évaporation, percolation et drainage) ;

(2) **Nitriflux**, module qui intègre le cycle et le transport de l'azote (amendements, ruissellement, minéralisation, immobilisation, nitrification, dénitrification, prélèvement d'azote par la culture, drainage et lessivage) ;

(3) **Pestiflux**, qui concerne le devenir des produits phytosanitaires et de leurs sous-produits (application, volatilisation, ruissellement, adsorption/désorption rapide et lente, biodégradation, drainage et lessivage).

On note que le module HydriFlux est essentiel à toute simulation

1.1. Le bloc ENTRÉES, permet de créer, de modifier et d'enregistrer les différents fichiers des données d'entrée requises. C'est aussi dans ce bloc que l'utilisateur définit la simulation et lance l'application.

1.2. Le bloc SIMULATIONS contient la structure même des modèles suivants :

- *Le modèle HydriFlux* qui simule tous les processus ayant trait au transfert de l'eau dans la partie non saturée du sol (précipitations, infiltration, ruissellement, prélèvement par les plantes, évaporation, percolation, drainage). Dans ce module, l'utilisateur peut choisir d'utiliser l'option Drainage, pour simuler la présence de drains agricoles, et l'option Cultures, qui simule le prélèvement d'eau par la plante.

- *Le module NitriFlux* contient les processus qui représentent les transformations de l'azote dans le sol (amendements, ruissellement d'azote, minéralisation nette, nitrification, prélèvement par les plantes, dénitrification, incorporation des résidus de récolte et flux de nitrates). Dans ce module, l'utilisateur peut décider d'appliquer des engrais (organiques ou inorganiques) sur son champ par l'intermédiaire de l'option Fertilisations.

- *Le module PestiFlux* (version subséquente) contiendra les processus ayant trait respectivement aux transformations des pesticides dans le sol.

- *Le module HydriFlux* est essentiel à toute simulation. Si l'utilisateur désire étudier uniquement la dynamique de l'eau dans le sol, il peut utiliser ce module indépendamment de NitriFlux. Si la dynamique de l'azote l'intéresse, il doit combiner les modules HydriFlux et NitriFlux. Les options relatives à chacun des modules peuvent être activées lorsque les modules concernés sont utilisés dans la simulation.

1.3. Le bloc SORTIES permet de visualiser graphiquement les résultats d'une simulation et d'effectuer certaines transformations sur les résultats.

1.4. Les fichiers

A priori, les fichiers d'entrées et de sorties sont stockés dans le répertoire par défaut, i.e. le répertoire où a été installé AgriFlux. Pendant une session de travail, l'utilisateur peut

modifier ce répertoire par défaut en utilisant le chemin complet lors de la sauvegarde des fichiers.

1.4.1. Fichiers entrés

Les données d'entrée requises sont regroupées dans différents fichiers spécifiques selon la nature de l'information qu'ils contiennent (fig.17). Il existe six fichiers de données :

- le profil de sol,
- les données climatiques,
- les pratiques culturales,
- les paramètres nécessaires à la simulation du cycle de l'azote,
- les données sur les fertilisants ou pesticides et leurs caractéristiques,
- et finalement les caractéristiques du scénario à simuler.

1.4.2. Fichiers résultats

AgriFlux génère quatre types de fichiers résultats différents (fig.17):

- Les fichiers de flux journaliers d'eau, nitrates et pesticides,
- Les fichiers de flux cumulés d'eau et de nitrates (journaliers, mois ou à l'année) pendant la durée spécifiée par l'utilisateur dans l'item RÉSULTATS.
- Les fichiers de concentrations journalières en nitrates/pesticides des différents flux d'eau (lessivé, ruisselé ou drainé sont calculées à la demande de l'utilisateur (item RÉSULTATS). La valeur moyenne des flux journaliers est utilisée.
- Les fichiers contenant l'état des réservoirs (moyenne et écart-type) de carbone et d'azote du sol à une date spécifiée par l'utilisateur.

L'extension des fichiers sont présentés dans le tableau 4.

CONTENU DU FICHIER	EXTENSION
Flux journaliers d'eau ruisselée	RUE
Flux journaliers de nitrates ruisselés	RUN
Flux journaliers d'eau lessivée	LEE
Flux journaliers de nitrates lessivés	LEN
Flux journaliers d'eau drainée	DRE
Flux journaliers de nitrates drainés	DRN
Contenus en azote du réservoir LITIÈRE	LIN
Contenus en carbone du réservoir LITIÈRE	LIC
Contenus en azote du réservoir FÈCES	FEN
Contenus en carbone du réservoir FÈCES	FEC
Contenus en azote du réservoir HUMUS	HUN
Contenus en N-NH ₄ ⁺ du réservoir AMMONIUM	NH4
Contenus en N-NO ₃ ⁻ du réservoir NITRATES	NO3
Flux cumulés d'eau ruisselée	REC
Flux cumulés de nitrates ruisselés	RNC
Flux cumulés d'eau lessivée	LEC
Flux cumulés de nitrates lessivés	LNC
Flux cumulés d'eau drainée	DEC
Flux cumulés de nitrates drainés	DNC
Concentrations en nitrates de l'eau ruisselée	RCO
Concentrations en nitrates de l'eau lessivée	LCO
Concentrations en nitrates de l'eau drainée	DCO

Tableau 4. Extensions des fichiers résultats

Le premier fichier et le dernier sont créés automatiquement lors d'une simulation et portent le même nom que le fichier *.SIM utilisé. Les deux autres fichiers sont créés à la demande de l'utilisateur par l'intermédiaire de l'interface usager à l'item RÉSULTATS du menu principal et l'utilisateur peut les nommer à son gré (fig.18).

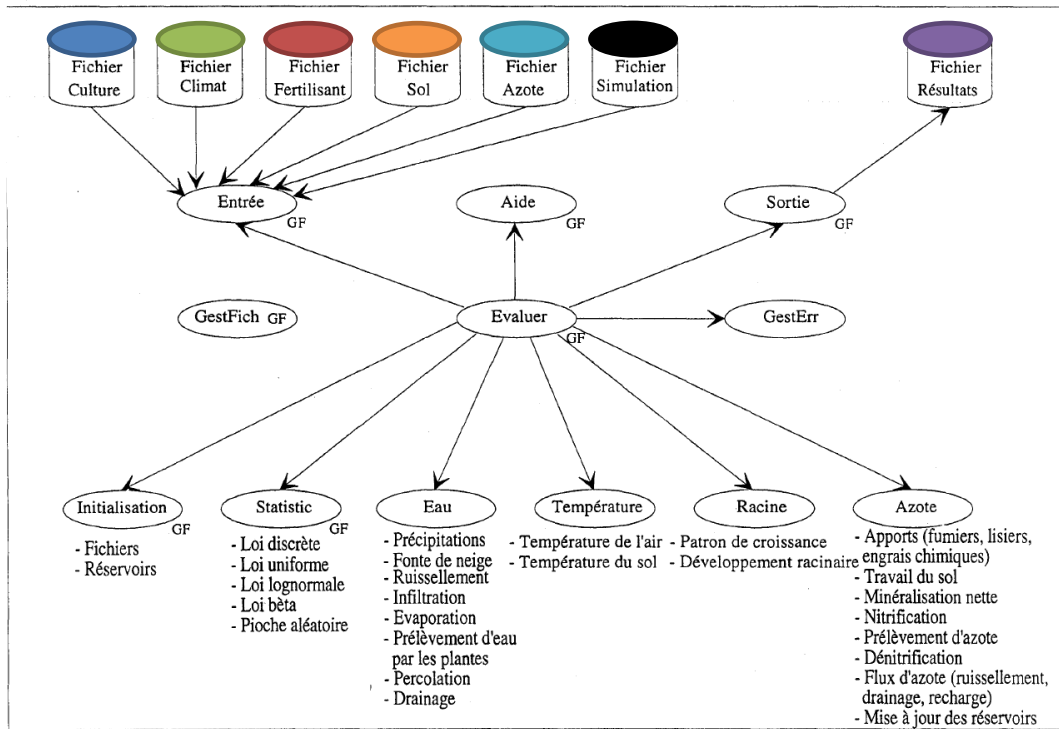


Figure 17. Fichiers d'entrés et fichiers des résultats



Figure 18. Fenêtre principale d'Agriflux2.0 (Manuel d'utilisateur Agriflux 2.0)

2. Approche statistique

Comme mentionné précédemment, le modèle développé est de nature stochastique, c'est-à-dire qu'au lieu d'utiliser une valeur ponctuelle pour chaque paramètre, il donne à l'utilisateur la possibilité de définir la distribution statistique à laquelle appartient chacun des paramètres requis. Au moment de l'exécution, le modèle effectue le nombre de simulations demandé en piochant aléatoirement une valeur, pour chaque simulation stochastique, dans la distribution de chaque paramètre. Les distributions pouvant être déclarées pour les données d'entrée sont les distributions *discrète, uniforme, normale, log normale ou Bêta* (Fig.19). Les résultats calculés par le modèle sont représentés par leur moyenne et leur écart-type.

Figure 19. Fenêtre des choix des lois et paramètres (Manuel d'utilisateur Agriflux 2.0)

2.1. Présentation des paramètres des fichiers

2.1.1. Fichier simulation (*.SIM)

Le fichier Simulation contient tous les paramètres nécessaires à l'exécution du programme (Tab.5) et la fenêtre de simulation en figure 20.

Ligne	Contenu	Valeur
1	Version du logiciel :	v2.0
2	Date début de simulation	jour ; mois ; année
3	Date fin de simulation	jour ; mois ; année
4	État des réservoirs	1=mensuel ; 2=annuel
5	Date pour l'état des réservoirs	jour ou jour ; mois
6	Nombre de simulations	[1 ; 1000]
6	Option Cultures	1=Oui ; 0=Non
7	Option Cycle de l'azote	1=Oui ; 0=Non
8	Option Fertilisants	1=Oui ; 0=Non
9	Option Précipitations	1=générées ; 0=fournies
10	Option Pesticides	1=Oui ; 0=Non
11 à 19	Fichiers utilisés pour la simulation	fichier *.SOL fichier *.CLI ...etc...
20	Date et heure de début de simulation	

Note : Les lignes 11 à 20 sont inscrites dans le fichier au moment de l'exécution.

Tableau 5. Structure d'un fichier Simulations (*.SIM)

Simulation

Nombre de simulations: 10

Date de début de simulation: Jour : 1 Mois : 5 Année : 1990

Date de fin de simulation: Jour : 1 Mois : 12 Année : 1992

État des réservoirs: Annuellement Mensuellement

Jour pour l'état des réservoirs: Jour : 1 Mois : 1

OPTIONS :

Cultures: OUI NON

Cycle de l'azote: OUI NON

Fertilisants: OUI NON

Pesticides: OUI NON

Précipitations: Générées Fournies

OK Annuler

Figure 20. Fenêtre de définition de la simulation (Manuel d'utilisateur Agriflux 2.0)

2.1.2. Fichier sol (*.SOL)

Le modèle AgriFlux2.0 simule le transport de l'eau et des contaminants dans la zone non saturée du sol (Tab.6 et Fig.21) et (. Il est donc nécessaire de définir le profil de sol jusqu'à la nappe phréatique ou du moins jusqu'à une profondeur au-delà de laquelle on considérera que l'activité biochimique du sol est négligeable et que les flux d'azote et de pesticides ne peuvent plus être atténués.

Ligne	Contenu	Valeur
1	Version du logiciel :	v.2.0
2	Nombre de couches	[1 , 20]
3	Paramètre non utilisé	
4	Profondeur maximum d'évaporation (m)	[0 , 20]
5	Pente du terrain (%)	[0 , 100]
6	Présence de drains	1=Oui ; 0=Non
7	Si drains : couche au-dessus des drains	[1 , nombre de couches]
8	Si drains : couche en-dessous des drains	[1 , nombre de couches]
9	Si drains : espacement des drains	]0 , 1000]
10	Présence d'une couche imperméable	1=Oui ; 0=Non
11	Présence de MacroPorosité	1=Oui ; 0=Non
12	Si MacroPorosité : Nombre de couches touchées par la macroporosité	[1 , nombre de couches]
13	Si MacroPorosité : Fraction de la surface touchée par la macroporosité	[0 , 1]
14	Si MacroPorosité : Début de la période de structuration du sol	jour ; mois ; année
15	Si MacroPorosité : Fin de la période de structuration du sol	jour ; mois ; année
16	Conductivité hydraulique à saturation ($m \cdot j^{-1}$)	[0.0000001 , 100]
17	Contenu en sable (%)	[0 , 100]
18	Contenu en limon (%)	[0 , 100]
19	Contenu en argile (%)	[0 , 100]
20	Porosité ($m^3 \cdot m^{-3}$)	]0 , 1]
21	Point de flétrissement ($m^3 \cdot m^{-3}$)	]0 , 1]
22	Capacité au champ ($m^3 \cdot m^{-3}$)	[0 , 1]
23	Epaisseur (m)	[0.01 , 5]
24	Densité apparente sèche ($g \cdot cm^{-3}$)	[0.5 , 5]
25	Contenu en matière organique (%)	]0 , 100]
26	Fraction de matière organique dissoute	[0 , 1]
27	Si Macroporosité et couche touchée par la macroporosité : facteur de majoration de la conductivité hydraulique à saturation en présence de macroporosité ($m \cdot j^{-1}$)	[1 , 1000]

Note : Les lignes 16 à 27 se répètent pour chaque couche

Tableau 6. Structure du fichier Caractéristiques du sol (*.SOL)

Caractéristiques du sol [?] [X]

Général | Couche 1 | Couche 2 | Couche 3

Nombre de couches: 3

Limite imperméable à la base du profil? OUI NON

Présence de drains dans le profil? OUI NON

Présence de macroporosité? OUI NON

Pente du sol (%): D: (2)

Profondeur maximale d'évaporation (m): D: (0.1)

Drainage

Espacement des drains (m): D: (0)

Numéro de la couche au dessus du drain: 1

Macroporosité

Nombre de couches touchées par la macroporosité: 3

Fraction de la surface touchée par la macroporosité: D: (0.3)

Début de la période de structuration: Jour: 1 Mois: 6

Fin de la période de structuration: Jour: 31 Mois: 8

OK Annuler

Figure 21. Fenêtre de définition des caractéristiques générales du sol (Manuel d'utilisateur Agriflux 2.0)

2.1.3. Fichier climat (*.CLI)

Le fichier Climat contient toutes les informations nécessaires à la génération des Précipitations, à la gestion de l'évapotranspiration et au calcul des températures de l'air et du sol (Tab.7 et fig.22).

Ligne	Contenu	Valeur
1	Version du logiciel :	v.2.0
2	Précipitations simulées	1=générées ; 2=fournies
3	Nombre de jours de précipitations	[0 , 365]
4	Jour où la température est la plus froide	[1 , 365]
5	Fraction de neige au sol au début de la fonte	[0 , 1]
6	Taux de fonte de la neige (m/°C/jour)	]0 , 0.1]
7	Précipitation moyenne mensuelle (m)	[0 , 1]
	Température moyenne mensuelle (°C)	[-30 , 50]
	Evaporation moyenne mensuelle (m)	[0 , 1]

Note : La ligne 7 se répète pour chaque mois. Dans le cas où les précipitations sont fournies, la ligne 7 ne contient que la température et l'évaporation mensuelle.

Tableau 7. Structure d'un fichier Climat (*.CLI)

Simulation des précipitations : Générées Fournies

Nombre de jours de pluie

Jour où la température est la plus basse

Fraction de neige au sol au début de la fonte

Taux de fonte de la neige (m/°C/jour)

	Précipitation (m)	Température (°C)	Évaporation (m)
Janvier	0.0904	-11.7	0
Février	0.0847	-10.4	0
Mars	0.0778	-4.3	0
Avril	0.0694	3.5	0
Mai	0.086	11.1	0.1003
Juin	0.1027	16.6	0.1104
Juillet	0.1189	19.4	0.1231
Août	0.1094	17.9	0.0979
Septembre	0.01149	13.1	0.0644
Octobre	0.0888	7.2	0.0376
Novembre	0.0958	0.3	0
Décembre	0.1176	-8.7	0

OK Annuler

Figure 22. Fenêtre de définition des données climatiques

2.1.4. Fichier précipitation (*.PRE)

Un fichier de précipitations de 365 valeurs est requis pour chaque année simulée (Tab.8)

Ligne	Contenu	Valeur
1	Version du logiciel :	v2.0
2	Hauteur d'eau précipitée dans une journée (m)	[0 , 1]

Note : La ligne 2 se répète autant de fois qu'il y a de jours dans la chronique.

Tableau 8. Structure d'un fichier Précipitations (*.PRE)

2.1.5. Fichier cycle de l'azote (*.AZO)

Le fichier Caractéristiques du cycle de l'azote contient toutes les informations nécessaires à la simulation des transformations de l'azote dans le sol (Tab.9 et Fig.23).

Ligne	Contenu	Valeur
1	Version du logiciel :	v.2.0
2	Nombre de couches	[1 , 20]
3	Constante de dégradation de la Litière (j^{-1})	[0.001 , 0.1]
4	Constante de dégradation des Fèces (j^{-1})	[0.001 , 0.1]
5	Efficacité de la synthèse microbienne de la Litière	[0 , 1]
6	Efficacité de la synthèse microbienne des Fèces	[0 , 1]
7	Fraction de la Litière passant à l'Humus	[0 , 1]
8	Fraction des Fèces passant à l'Humus	[0 , 1]
9	Rapport C/N du sol	]0 , 100]
10	Constante de minéralisation de l'Humus (j^{-1})	[0.00001 , 0.001]
11	Fraction de l'azote inorganique disponible	]0 , 0.5]
12	Rapport NO_3^- / NH_4^+ du sol	]0 , 100]
13	Constante de nitrification (j^{-1})	[0.01 , 1]
14	Constante de demi-saturation pour la dénitrification ($mg N \cdot l^{-1}$)	[0 , 50]
15	Constante de dénitrification ($gN \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$)	[0.01 , 1]
16	Profondeur maximale de dénitrification (m)	[0 , 20]
17	Patron de dénitrification	1=exp ; 2=lin ; 3=const
18	Contenu en C du réservoir Litière ($kg C \cdot ha^{-1}$)	[0 , 50000]
19	Contenu en N du réservoir Litière ($kg N \cdot ha^{-1}$)	[0 , 50000]
20	Contenu en C du réservoir Fèces ($kg C \cdot ha^{-1}$)	[0 , 50000]
21	Contenu en N du réservoir Fèces ($kg N \cdot ha^{-1}$)	[0 , 50000]
22	Contenu en N du réservoir Humus ($kg N \cdot ha^{-1}$)	[0 , 50000]
23	Contenu en N du réservoir Ammonium ($kg N \cdot ha^{-1}$)	[0 , 50000]
24	Contenu en N du réservoir Nitrates ($kg N \cdot ha^{-1}$)	[0 , 50000]

Tableau 9. Structure du fichier Azote (*.AZO)

Caractéristiques du cycle de l'azote - cycle_azo

Général | Couche 1 | Couche 2 | Couche 3

Nombre de couches : 3

MINÉRALISATION/IMMOBILISATION

Constante de dégradation de la litière (1/jour)	N: (4e-02) (4e-03)
Constante de dégradation des fèces (1/jour)	D: (0.035)
Efficacité de la synthèse microbienne de la litière	N: (5e-01) (5e-02)
Efficacité de la synthèse microbienne des fèces	D: (0)
Fraction de la litière passant à l'humus	N: (2e-01) (2e-02)
Fraction des fèces passant à l'humus	D: (0)
Rapport C/N du sol	U: (4e+00) (1e+01)
Constante de minéralisation de l'humus (1/jour)	N: (3e-05) (3e-06)
Fraction de l'azote inorganique disponible	N: (1e-01) (1e-02)

NITRIFICATION

Rapport NO ₃ /NH ₄ du sol	U: (1e+01) (2e+01)
Constante de nitrification (1/jour)	N: (2e-01) (2e-02)

DÉNITRIFICATION

Constante de demi-saturation pour la dénitrification (mg N/l)	N: (1e+01) (1e+00)
Constante de dénitrification (g N/m ² /jour)	N: (2e-01) (2e-02)
Profondeur maximale de dénitrification (m)	N: (1e+00) (1e-01)

Patron de dénitrification Exponentiel Linéaire Constant

OK Annuler

Figure 23. Fenêtre de définition des caractéristiques générales du cycle de l'azote (Manuel d'utilisateur Agriflux 2.0)

2.1.6. Fichier fertilisant (*.FER)

Les amendements peuvent être appliqués en plusieurs doses au cours de l'année, toutes les combinaisons de fertilisants étant permises. Pour chaque amendement, l'utilisateur doit identifier la date d'application, mais le modèle peut déplacer l'application afin qu'elle coïncide avec une période relativement sèche : ceci permet de représenter les conditions réelles

d'épandage qui doivent, entre autres, permettre la circulation de la machinerie au champ (Tab.10 et Fig.24).

Ligne	Contenu	Valeur
1	Version du logiciel :	v.2.0
2	Nombre de fertilisations	[1 , 60]
3	Type de fertilisation	1=organique ; 2=inorganique
4	Date de fertilisation	jour ; mois ; année
5	Si fert. org. : Profondeur d'application (m)	[0 , 0.5]
6	Si fert. org. : Volume d'eau apporté (m ³ ·ha ⁻¹)	[0 , 500]
7	Si fert. org. : Contenu en Litière (kg N·ha ⁻¹)	[0 , 1000]
8	Si fert. org. : Contenu en Fèces (kg N·ha ⁻¹)	[0 , 1000]
9	Si fert. org. : Rapport C/N de la Litière	[0 , 200]
10	Si fert. org. : Rapport C/N des Fèces	[0 , 200]
11	Si fert. org ou inorg. : Contenu en NH ₄ ⁺ (kg N·ha ⁻¹)	[0 , 500]
12	Si fert. org ou inorg. : Contenu en NO ₃ ⁻ (kg N·ha ⁻¹)	[0 , 500]
13	Si fert. inorg. : Type de relargage	1=const. ; 2=exp.
14	Si fert. inorg. : Nombre de jours de relargage	[0 , 30]

Note : Les lignes 3 à 14 se répètent pour chaque fertilisation

Tableau 10. Structure d'un fichier Fertilisants (*.FER)

Caractéristiques des fertilisations - fert89-90

Général Fert 1 Fert 2 Fert 3 Fert 4

Date d'épandage Jour : 29 Mois : 5 Année : 1990

Type de fertilisation Organique Inorganique

FERTILISATION ORGANIQUE

Profondeur d'application (m) D: (0.1)

Volume d'eau apporté (m³/ha) D: (0)

Contenu en litière (kg N/ha) D: (35)

Contenu en fèces (kg N/ha) D: (35)

Rapport C/N de la litière D: (0)

Rapport C/N des fèces D: (50)

FERTILISATION INORGANIQUE

Contenu en NH₄ (kg N/ha) D: (36)

Contenu en NO₃ (kg N/ha) D: (103)

Type de relargage Constant Exponentiel

Nombre de jours de relargage D: (5)

OK Annuler

Figure 24. Fenêtre de définition des caractéristiques des fertilisants

2.1.7. Fichier Caractéristiques d'un pesticide (*.CPE)

Dans ce fichier sont saisis tous les paramètres relatifs à un pesticide particulier. Il doit y avoir autant de fichiers *.CPE qu'il y a de produits différents appliqués sur le sol (Tab.11 et fig.25).

Ligne	Contenu	Valeur
1	Version du logiciel :	v.2.0
2	Nom du pesticide	même que celui du fichier
3	Présence de volatilisation?	1=Oui ; 0=Non
4	Présence d'adsorption/désorption lente?	1=Oui ; 0=Non
5	Présence d'adsorption/désorption rapide?	1=Oui ; 0=Non
6	Présence de biodégradation?	1=Oui ; 0=Non
7	Présence d'hydrolyse?	1=Oui ; 0=Non
8	Nombre de Sous-Produits	[0 , 2]
9	Pression de vapeur du Composé Parent à 20°C (Pa)	[1*10 ⁻⁶ , 1]
10	Chaleur de vaporisation du Composé Parent (Pa·m ³ ·mol ⁻¹)	[10000 , 100000]
11	Solubilité du Composé Parent (mg·l ⁻¹)	[1*10 ⁻⁴ , 1*10 ⁶]
12	Coefficient de partition carbone organique / eau du Composé Parent (ml·g ⁻¹)	[0 , 1*10 ⁶]
13	Constante d'adsorption lente du Composé Parent (j ⁻¹)	[0.001 , 2000]
14	Constante de désorption lente du Composé Parent (j ⁻¹)	[0.001 , 2000]
15	Masse molaire du Composé Parent (g·mol ⁻¹)	[100 , 500]
16	Constante de biodégradation du Composé Parent (j ⁻¹)	[1*10 ⁻⁷ , 1]
17	Energie d'activation de la biodégradation du Composé Parent (J·mol ⁻¹)	[20000 , 200000]
18	Contenu en matière organique auquel la constante de biodégradation du Composé Parent a été déterminée (%)	]0 , 50]
19	Constante d'hydrolyse du Composé Parent (j ⁻¹)	[1*10 ⁻⁷ , 15]
20	Energie d'activation de l'hydrolyse du Composé Parent (J·mol ⁻¹)	[20000 , 200000]

Note : Les lignes 12 à 20 se répètent pour chaque Sous-Produit s'il y a lieu

Tableau 11. Structure d'un fichier Caractéristiques d'un pesticide

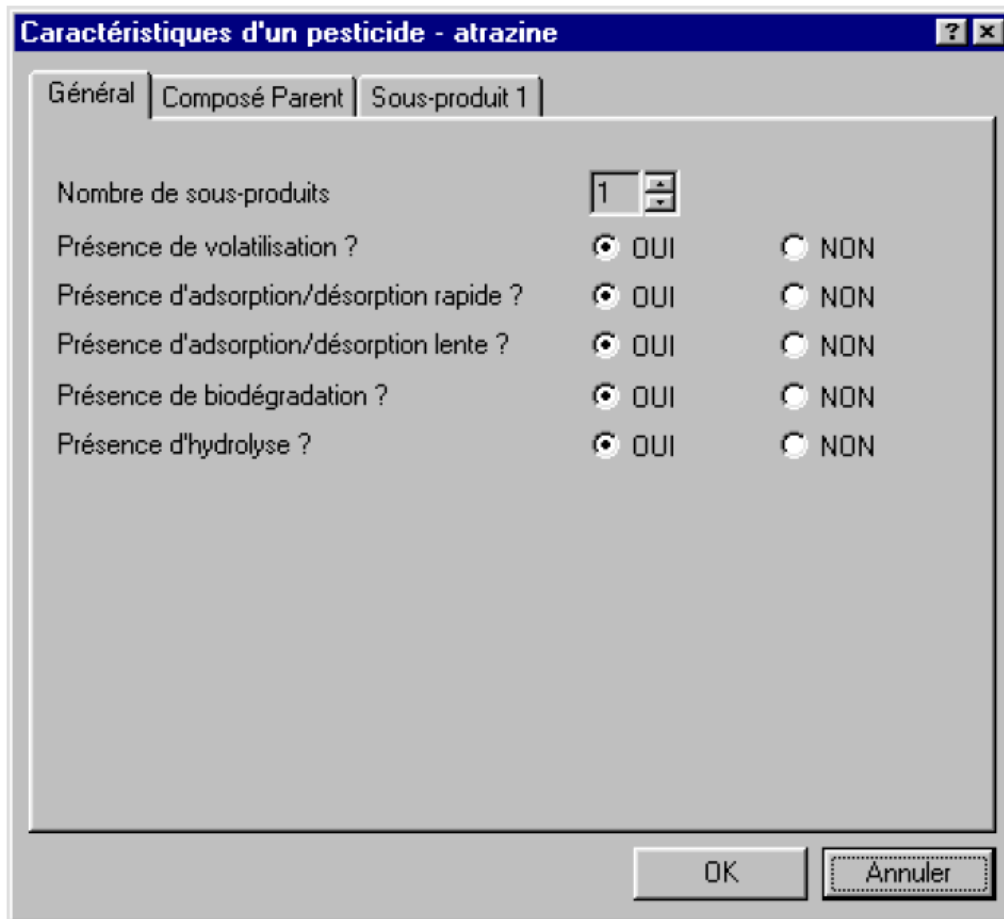


Figure 25. Fenêtre de définition des caractéristiques générales du pesticide (Manuel d'utilisateur Agriflux 2.0)

2.1.8. Fichier Application de pesticides (*.APE)

Dans ce fichier sont saisies toutes les informations relatives à une succession de plusieurs applications de pesticides (Tab.12 et Fig.26).

Ligne	Contenu	Valeur
1	Version du logiciel :	v.2.0
2	Nombre de pesticides différents simulés	[1 , 20]
3	Nom du pesticide no.1	nom du fichier *.CPE
4	Nombre d'applications	[1 , 20]
5	Date application no.1 - pesticide no.1	jour ; mois ; année
6	Profondeur d'application du pesticide (m)	[0 , 0.5]
7	Type d'application (Liquide ou Granule)	L=Liquide ; G=Granule
8	Si Granule : type de relargage (constant ou exponentiel)	C=constant ; E= exponentiel
9	Si Granule : nombre de jours de relargage (j)	[0 , 30]
10	Taux d'application (kg·ha ⁻¹)	]0 , 100]

Notes : Les lignes 5 à 10 se répètent pour chaque application de chaque pesticide simulé

Les lignes 2 à 10 se répètent pour chaque pesticide simulé

Tableau 12. Structure d'un fichier Application de pesticides (*.APE)

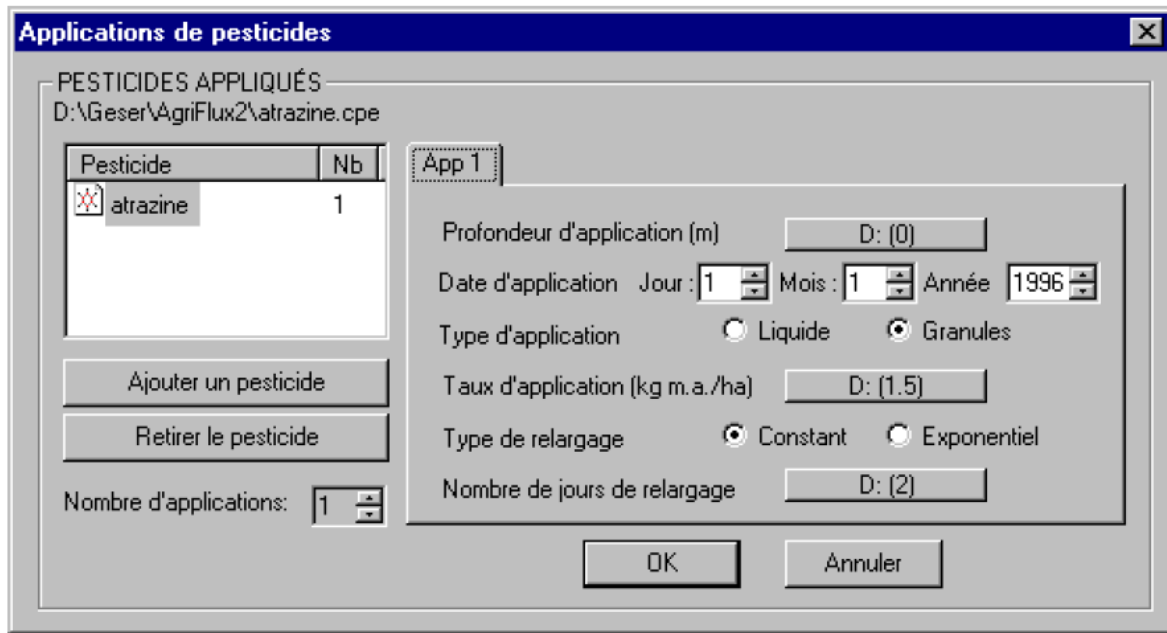


Figure 26. Fenêtre de définition des applications de pesticides (Manuel d'utilisateur Agriflux 2.0)

2.1.9. Fichier Caractéristiques d'une culture (*.CCU)

Dans ce fichier sont saisis tous les paramètres relatifs à une culture particulière (Tab.13 et Fig. 27).

Ligne	Contenu	Valeur
1	Version du logiciel :	v.2.0
2	Besoin en azote (kg N·ha ⁻¹)	]0 , 1000]
3	Besoin en eau (m)	]0 , 1]
4	Fraction de l'azote récoltée	[0 , 1]
5	Fraction de l'azote résiduelle	[0 , 1]
6	Rapport C/N des racines	]0 , 200]
7	Rapport C/N des résidus de récolte	]0 , 200]
8	Profondeur des racines à maturité (m)	[0 , 20]
9	Patron racinaire	1=exp ; 2=lin ; 3=const

Tableau 13. Structure d'un fichier Caractéristiques d'une culture (*.CCU)

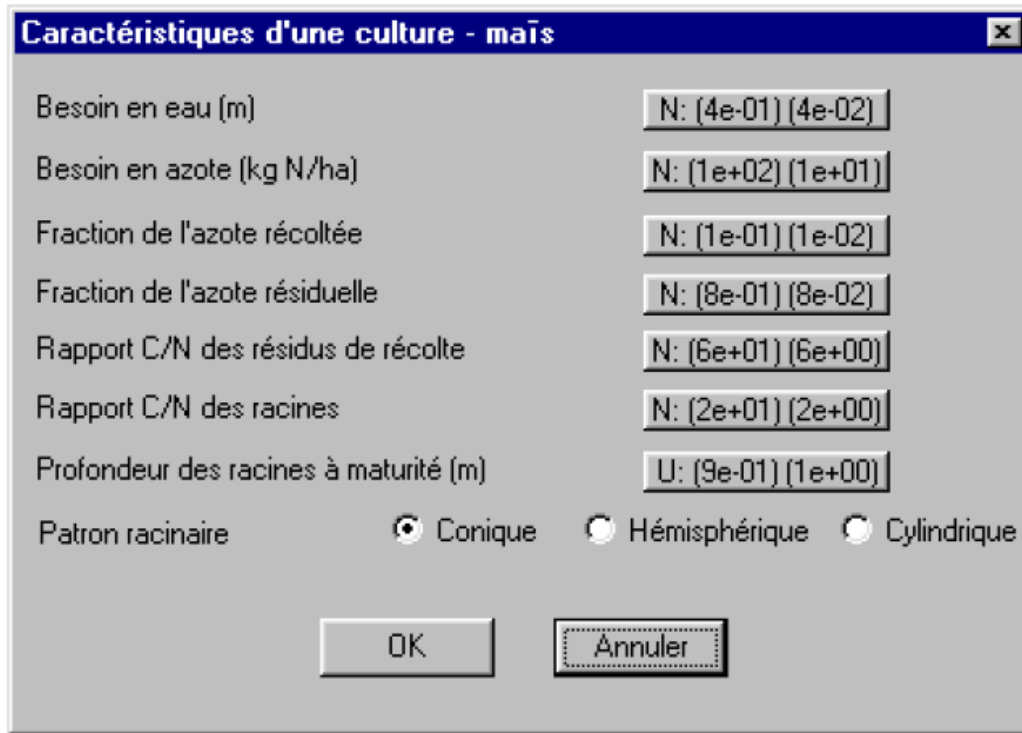


Figure 27. Fenêtre de définition des caractéristiques d'une culture (Manuel d'utilisateur Agriflux 2.0)

3. EXÉCUTION ET RÉSULTATS

3.1. Choix des fichiers de simulation

Il est possible de faire une simulation en choisissant le bouton Exécuter dans la fenêtre principale (Fig.28). Ce bouton ouvre la boîte de dialogue « Choix des fichiers de simulation » qui permet d'identifier les noms des fichiers nécessaires à la simulation (Figure 28). Les fichiers *.SOL et *.CLI sont essentiels à toute simulation. Si les précipitations ne sont pas générées par AgriFlux2.0, le fichier *.PRE correspondant à la première année simulée est requis. Le fichier *.CLT est requis si l'option Cultures est activée, les fichiers *.AZO et *.FER sont nécessaires dans le cas où les options Cycle de l'azote et Fertilisants sont demandées et les fichiers *.CPE et *.APE sont nécessaires dans le cas où l'option Pesticides est demandée. L'utilisateur doit choisir des fichiers compatibles au niveau des dates, du nombre de couches, des options, etc. S'il y a incompatibilité entre les différents fichiers, un message d'erreur s'affiche au moment de l'exécution.



Figure 28. Fenêtre de lancement de la simulation (Manuel d'utilisateur Agriflux 2.0)

3.2. Visualisation des résultats

Le bouton Résultats permet de sélectionner le fichier à visualiser. Tout de suite après, le graphique des résultats demandé s'affiche à l'écran.

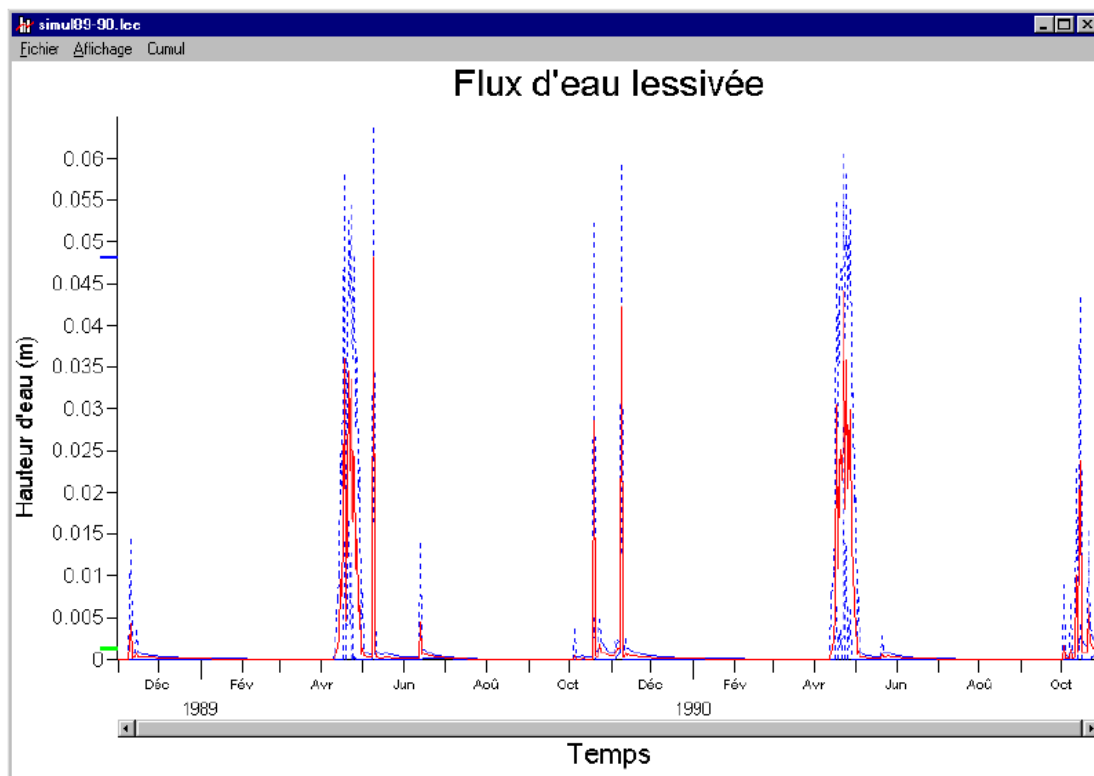


Figure 29. Flux d'eau lessivée (Manuel d'utilisateur Agriflux 2.0)

Chapitre IV.
Résultats et
discussions

Introduction

Ce chapitre présente les résultats des simulations faites par le logiciel Agriflux sur une période d'une année et de cinq. La première étape de modélisation a consisté à simuler les flux d'eau et à valider le bilan hydrique sur le sol. Par la suite, le lessivage des nitrates et pesticides ont été simulé sur les cultures agricoles. Les résultats de simulation sont ensuite comparés aux concentrations mesurées sur les échantillons d'eau souterraine de la nappe alluviale de Guelma.

La tomate et pomme de terre sont les types de cultures les dominantes au sein du périmètre de Guelma. Chaque année les pesticides organochlorés sont pulvérisée en surface du sol lorsque la culture était de quatre feuilles (pour les tomates fin mai et début juin) 2 à 3 fois, tout dépend des conditions météorologiques. La dose appliquée était de 300 g/ha en deux reprises, soit une quantité de 600 g/ha. Les fertilisants ont eu lieu sous forme inorganique avec des doses variant de 150 à 200 kg/ha en fonction des besoins des tomates.

1. La recharge et bilan hydrique

Le bilan hydrique a été évalué sur une période d'une année, de février 2006 à février 2007 et sur une période de cinq ans de janvier 2007 janvier 2013. La recharge est estimée selon la méthode de Thornthwaite est de 150 mm /an sur l'ensemble du bassin et le ruissellement est de 72 mm/an, correspondant à 12% des précipitations.

Les quantités d'eau lessivées et ruisselées simulées par Agriflux sont comptabilisées dans le tableau 14. Elles représentent les réponses moyennes annuelles d'Agriflux. Le ruissellement est nettement supérieur par rapport aux valeurs obtenues par la méthode de Thornthwaite. La plus grande partie des eaux de pluie sont évaporées et ruissellement.

Tableau 14. Résultats des simulations des flux d'eau

Période de simulation		RUF (mm)	Sortie d'eau simulée par Agriflux.2 (mm)		
			Lessivée	Ruisselée	Total
2007-2008	<i>Moy. annuelle</i>	100	13,46	296,3	309,76
2007-2013	<i>Moy. annuelle</i>	100	79,18	269,6	348,78

Les plus importants flux d'eau lessivés pour l'année 2007-2008 sont observés aux mois de Décembre et Avril avec une hauteur d'eau de 13.46 mm, par contre les flux ruisselés sont enregistrés aux mois de Décembre, Mars et Avril (Fig.29 et 30). Pour une période de cinq ans, les eaux lessivées sont évaluées à 79.18 mm et sont presque identique pour toute les années de simulation, par contre les eaux ruisselées sont les plus importantes avec une hauteur d'eau de 296.6 mm.

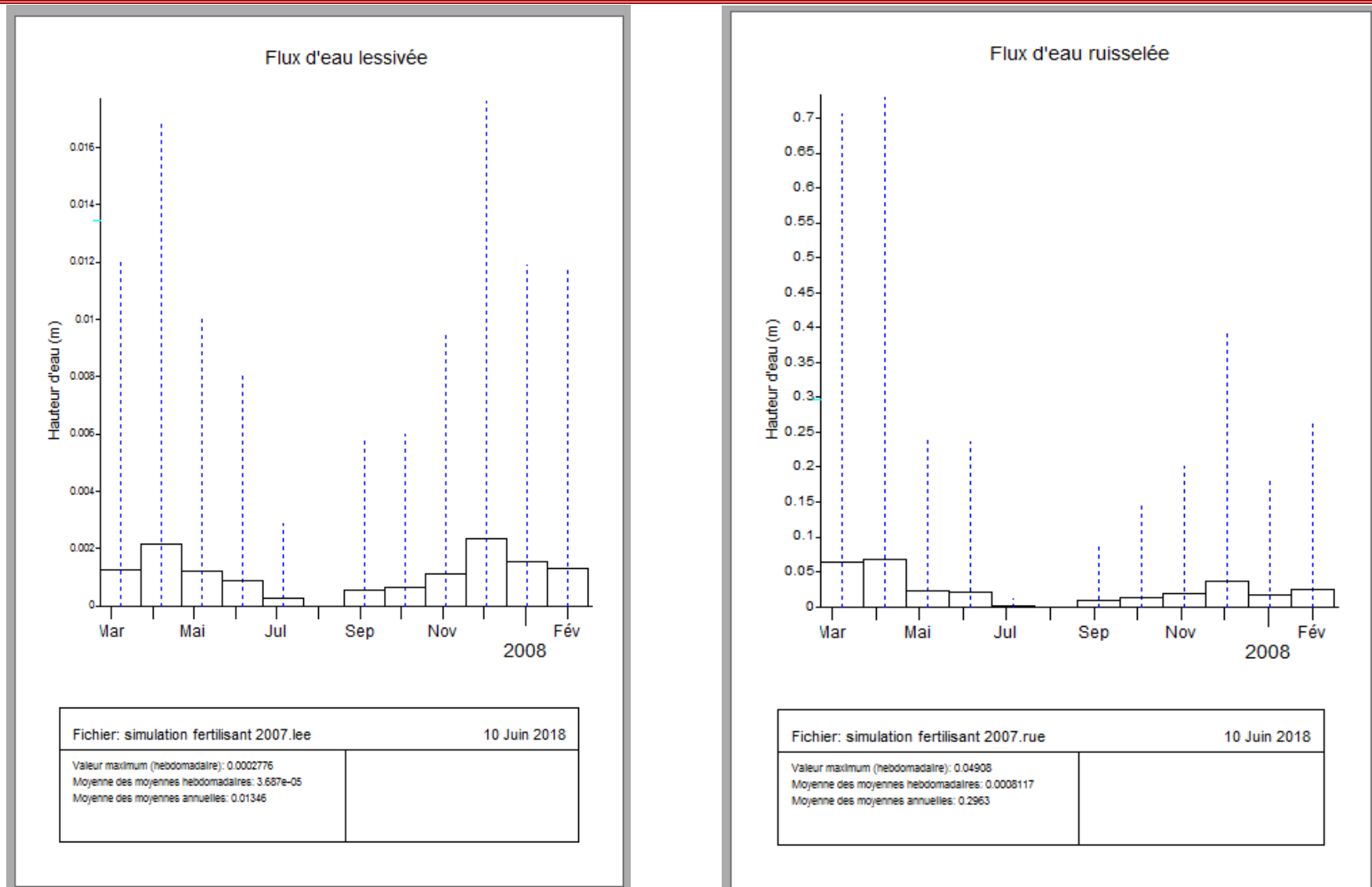


Figure 30. Simulation des flux d'eau lessivés et ruisselés pour un an (2007-2008)

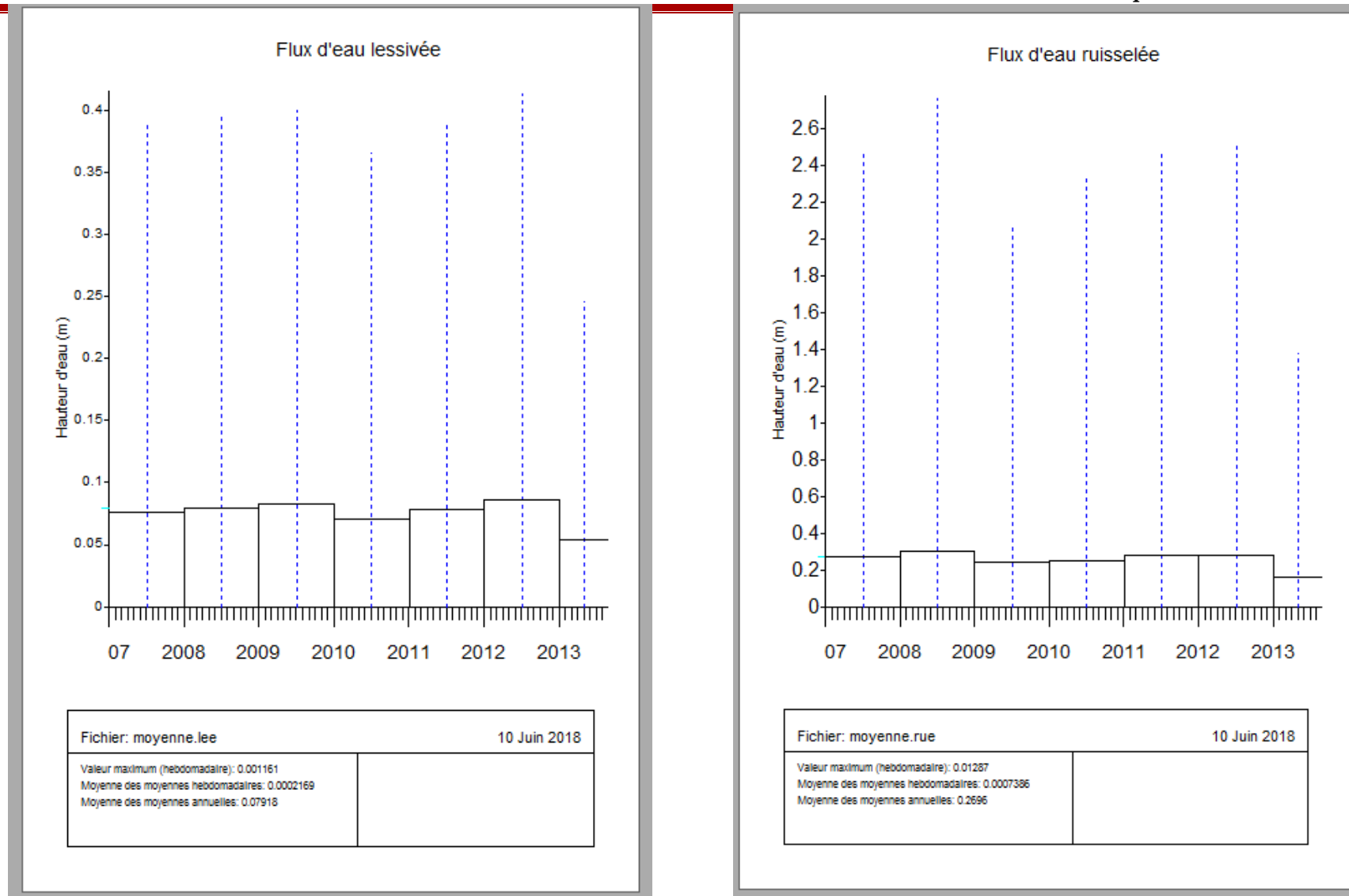


Figure 31. Simulation des flux d'eau lessivés et ruisselés pour cinq ans (2007-2013)

2. Simulation des flux de l'azote nitrique

Le logiciel Agriflux permet aussi de calculer la concentration en nitrates des eaux lessivées quittant la zone racinaire et les eaux ruisselées (Tab.15).

Tableau 15. Résultats de simulation de l'azote nitrique sur le sol

Période de simulation		Perte en nitrate				
		Flux en N- No3 kg/ha			Concentration en NO-3 mg/l	
		Lessivé	Ruisselé	Total	Lessivé	Ruisselé
2007-2008	<i>Moy. hebdomadaire</i>	0.033	0.037	0,07	84	3.28
	<i>Moy. annuelle</i>	12.30	13.51	25,81	3.06x10 ⁴	1199
2007-20013	<i>Moy. hebdomadaire</i>	0.047	0.035	0,082	24.76	4.73
	<i>Moy. annuelle</i>	17.46	12.96	30,42	9036	1727

Les résultats des simulations des flux de l'azote sortant du sol du périmètre irrigué de Guelma montrent que la perte annuelle en azote est plus considérable que ce soit par ruissellement ou par lessivage et varie de 12.3 à 17.46 kg/ha, soit une perte totale de 30 kg/ha (Fig.32 et 34).

Les concentrations en nitrates sont plus considérables dans les eaux lessivées de moyenne annuelle de 3x10⁴ mg/l que dans les eaux ruisselées (1199 mg/l) et dépassent largement les concentrations admises (Fig.33 et 35). Les NO3 produits au cours du cycle de l'azote ou injectés en tant que fertilisants par l'agriculteur et non prélevés par les plantes sont mis en solution et migrent avec l'eau de ruissellement pour atteindre les eaux de surfaces et par la suite les eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma.

Une caractérisation adéquate des différents paramètres est donc primordiale pour simuler avec représentativité et fiabilité des différents processus impliqués dans le transfert des flux d'eau et des fertilisants.

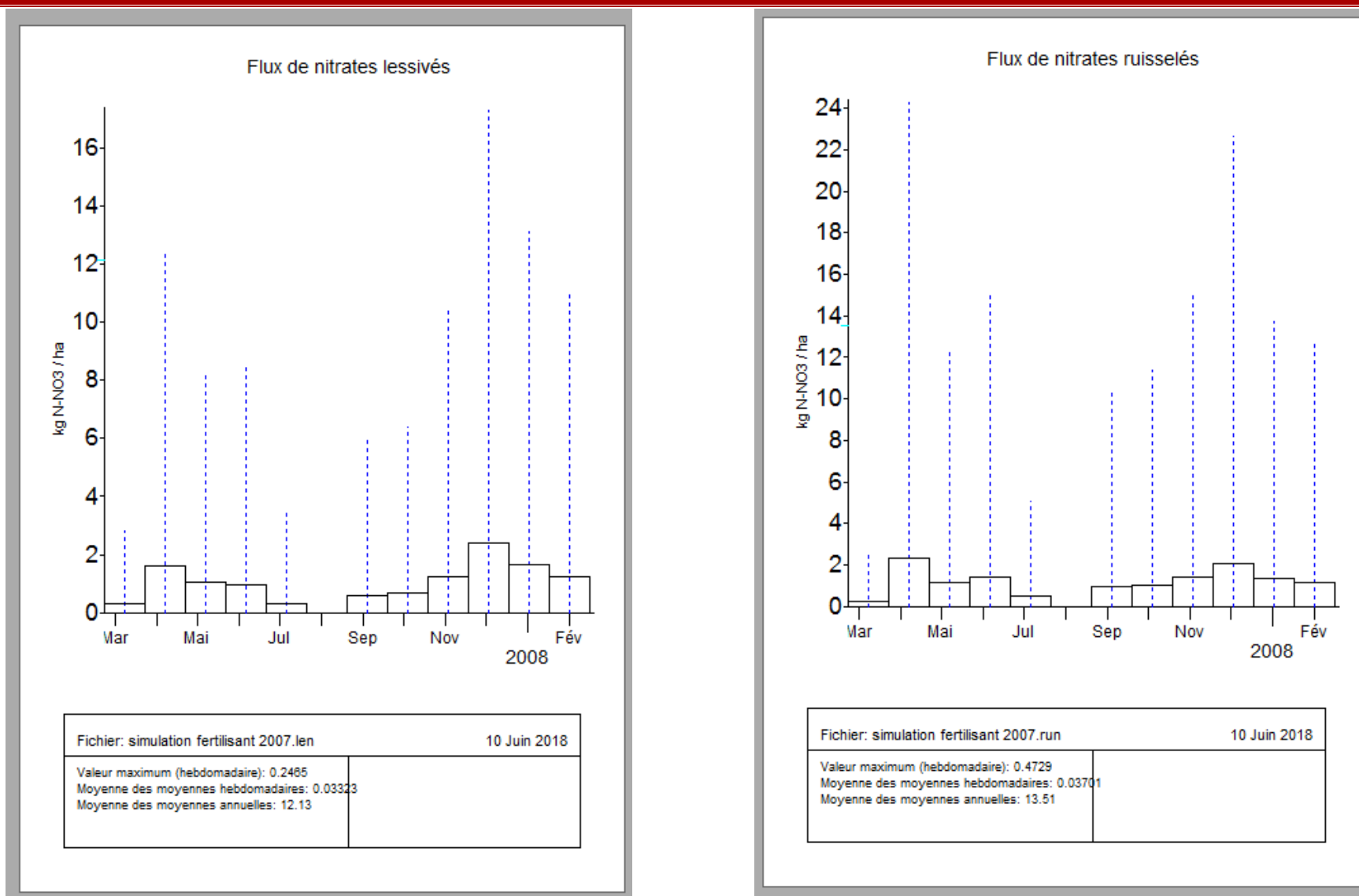


Figure 32. Simulation des flux de nitrates lessivés et ruisselés pour un an (2007-2008)

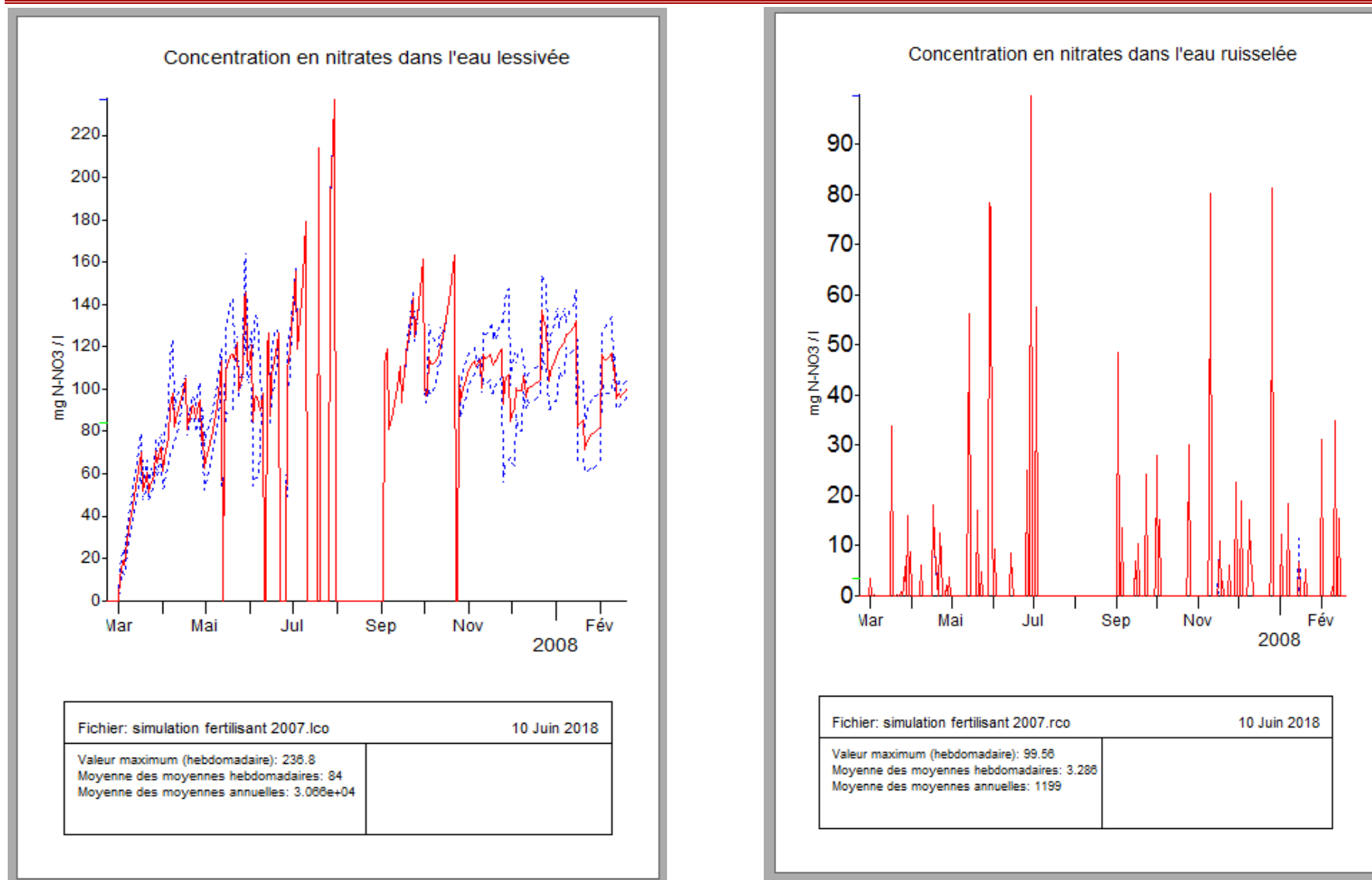


Figure 33. Simulation des concentrations des nitrates lessivées et ruisselées pour un an (2007-2008)

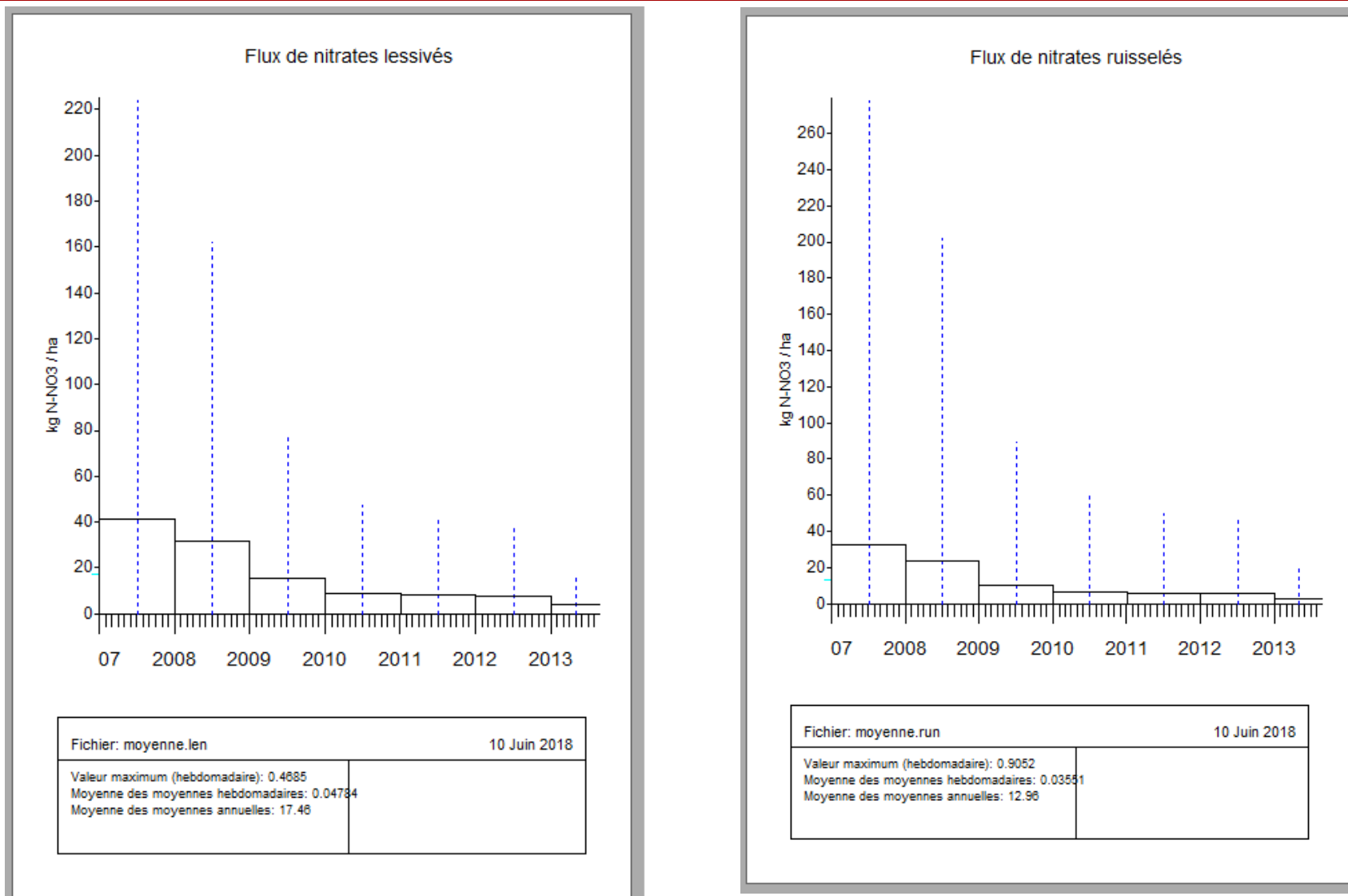


Figure 34. Simulation des flux de nitrates lessivés et ruisselés pour cinq ans (2007- 2013)

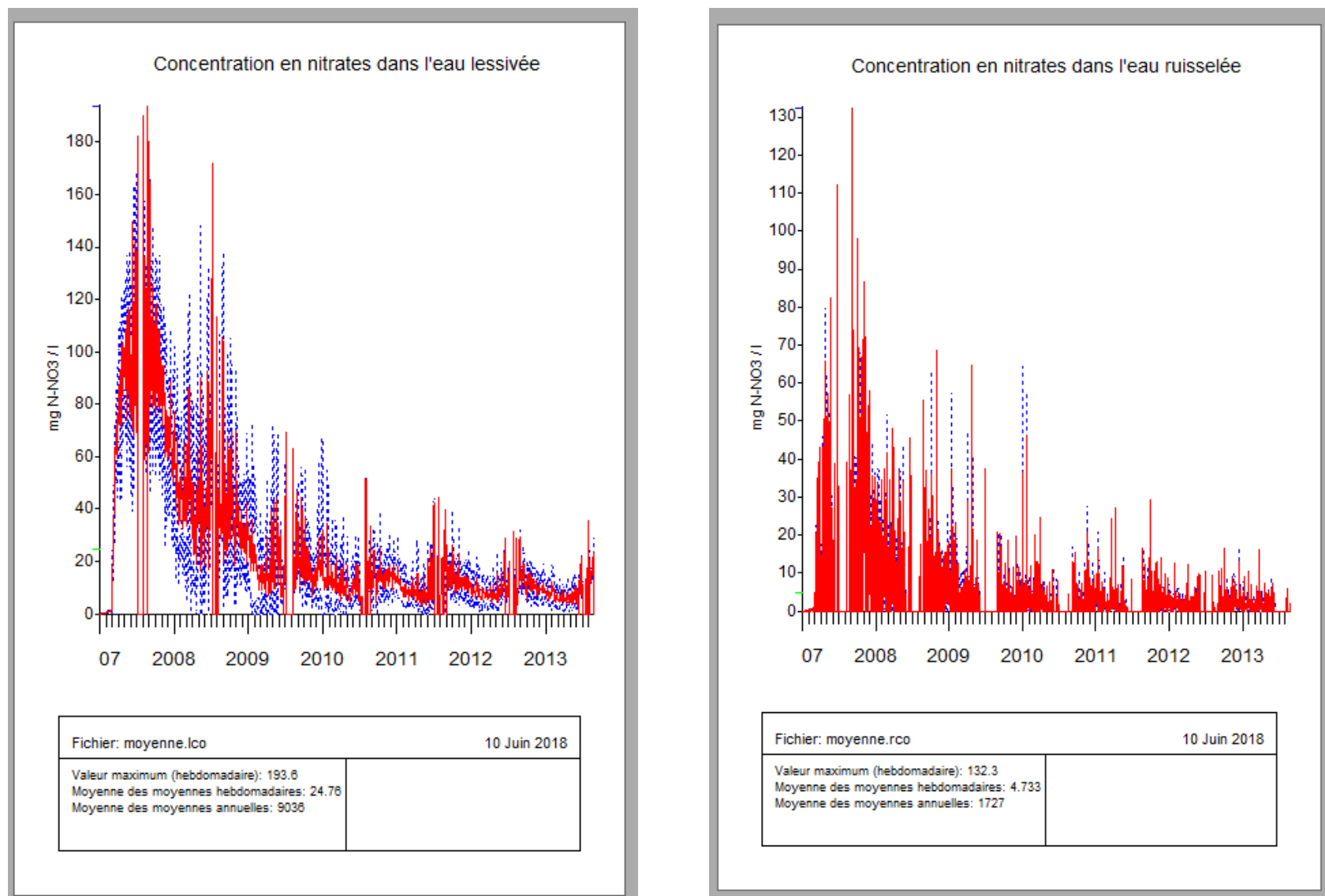


Figure 35. Simulation des concentrations des nitrates lessivées et ruisselées pour cinq ans (2007-2013)

3. Simulation des pesticides

3.1. Transfert de l'endosulfan

A partir des fichiers de simulation définis précédemment pour les caractéristiques des sols, le transfert de l'endosulfan (pesticide détecté dans les sols du périmètre irrigué de Guelma) a été simulé pour une période d'une année (2007-2008) et de cinq ans (2007-2013). Des tests ont été menés sur les paramètres liés aux processus d'adsorption/désorption (rapides et lentes) ayant une influence marquée sur le devenir des pesticides dans les sols. Plusieurs auteurs (Larocque et al., 1998; Boivin, 2003; Novak et al., 2003) ont en effet montré que ces processus étaient parmi les plus influents sur les résultats de transfert de divers pesticides.

Les figures 36 et 37 présentent les résultats des simulations des flux et concentrations en endosulfan dans les eaux lessivées et ruisselées des sols du périmètre irrigué de Guelma avec la prise en compte du processus d'adsorption/désorption adsorption/désorption lentes. Les résultats sont représentés dans le tableau 16.

Après le traitement aux moins de mai et juin 2007, quand seul le phénomène d'adsorption/désorption lent est considéré, nous constatons que le flux de l'endosulfan lessivé et ruisselé est très faible. Les flux importants sont observés aux moins de Décembre et Janvier avec une moyenne annuelle 0.24 g/ha et de 0.15 g/ha respectivement. Cela peut être expliqué par le fait que le phénomène adsorption est le plus dominant dans le transfert de l'endosulfan à cause de la haute teneur en matière organique ($MO > 5\%$) des sols du périmètre irrigué de Guelma (kachi.N et al. 2015). Le pesticide ainsi absorbé ne migre pas avec les flux d'eau lessivés et ruisselés. Pour être mobilisable, il doit d'abord être désorbé.

Les concentrations simulées de l'endosulfan sont plus importantes au niveau des eaux lessivées que dans les eaux ruisselées. De 2007-2013, les concentrations sont plus élevées (52.65 $\mu\text{g/l}$), ceci pourrait être s'expliquer par l'accumulation de l'endosulfan sur les sites d'adsorption lente (Fig.38 et 39).

Tableau 16. Résultats de simulation de l'endosulfan

Période de simulation		Perte de l'endosulfan				
		Flux en endosulfan kg/ha			Concentration en endosulfan µg/l	
		Lessivé	Ruisselé	Total	Lessivé	Ruisselé
2007-2008	<i>Moy. hebdomadaire</i>	6.81×10^{-7}	4.23×10^{-7}	$11,04 \times 10^{-7}$	1.5	0.02
	<i>Moy. annuelle</i>	2.48×10^{-4}	1.54×10^{-4}	4.02×10^{-4}	551.60	7.91
2007-20013	<i>Moy. hebdomadaire</i>	4.84×10^{-6}	1.45×10^{-6}	6.29×10^{-6}	2.17	0.14
	<i>Moy. annuelle</i>	1.76×10^{-3}	5.35×10^{-4}	2.29×10^{-3}	795.50	52.65

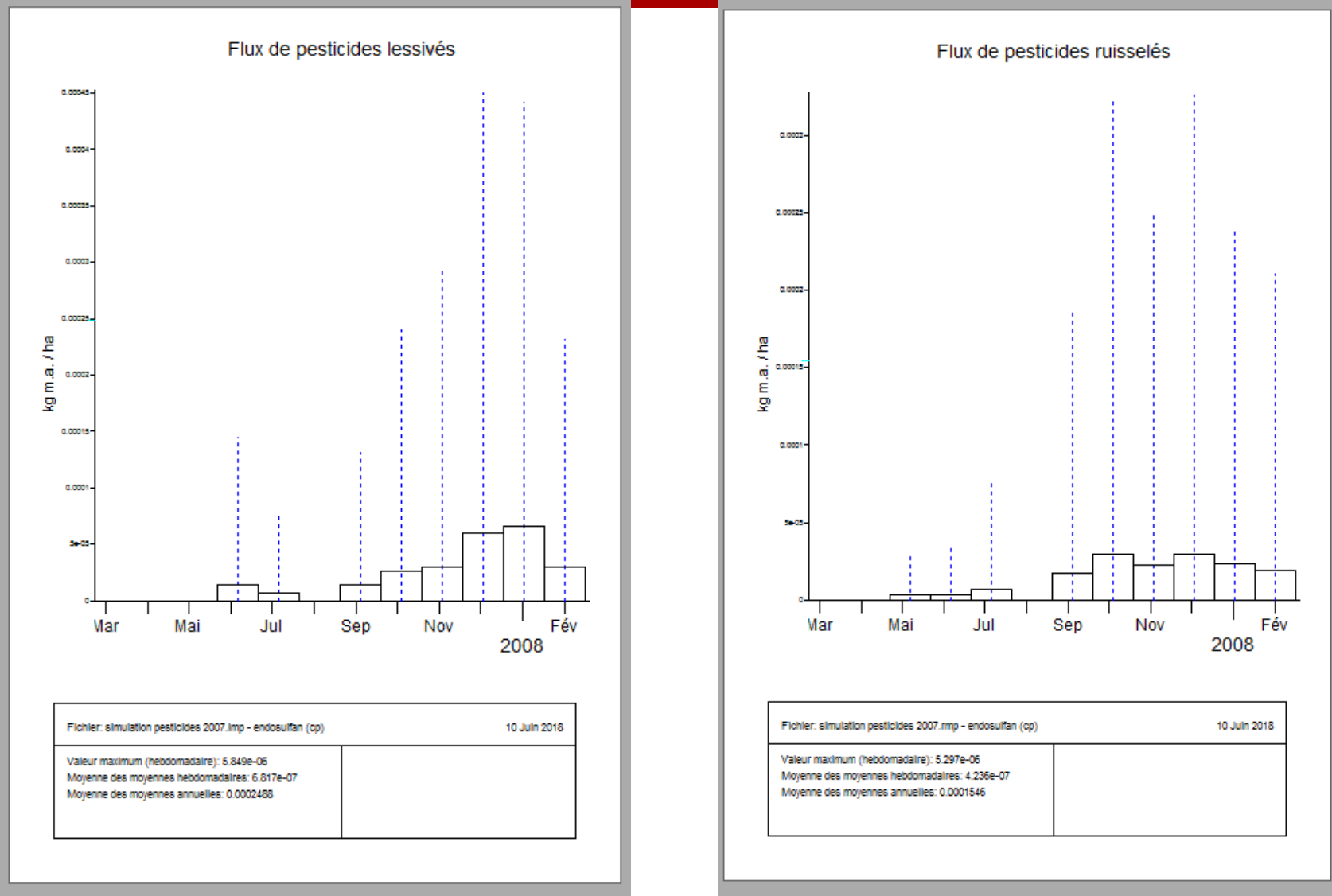


Figure 36. Simulation des flux de l'endosulfan lessive et ruiselé pour un an (2006- 2007)

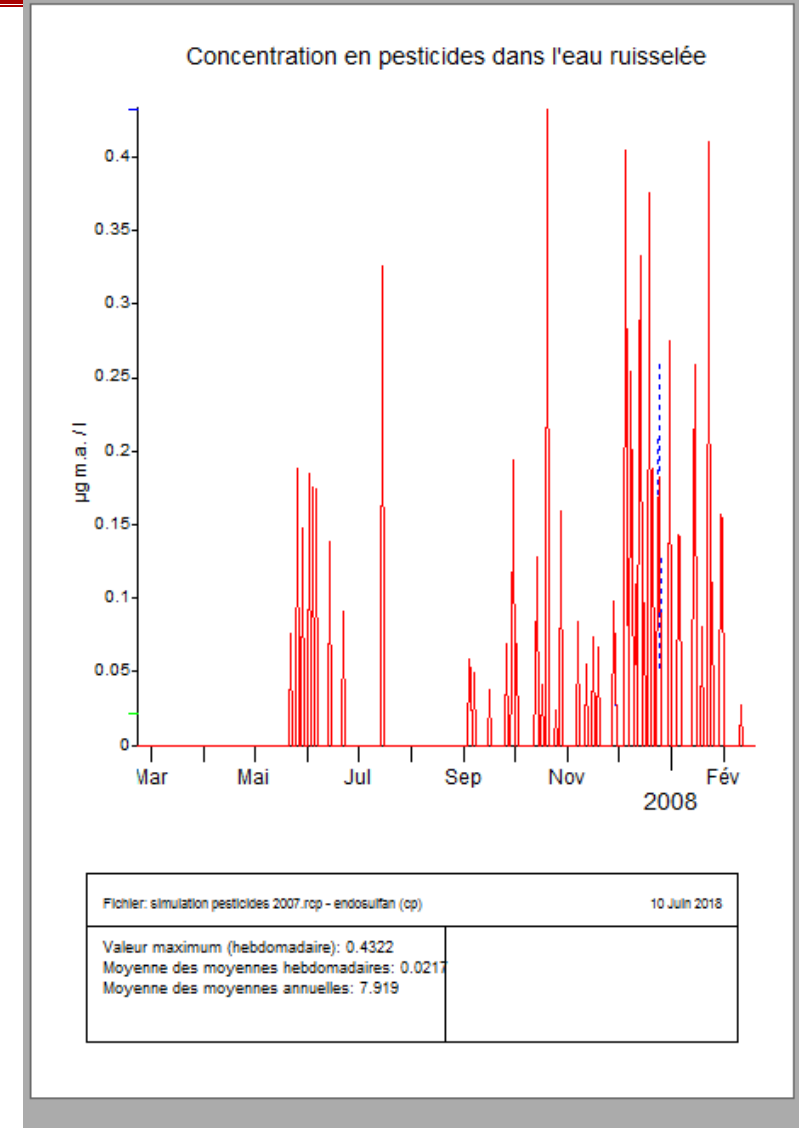
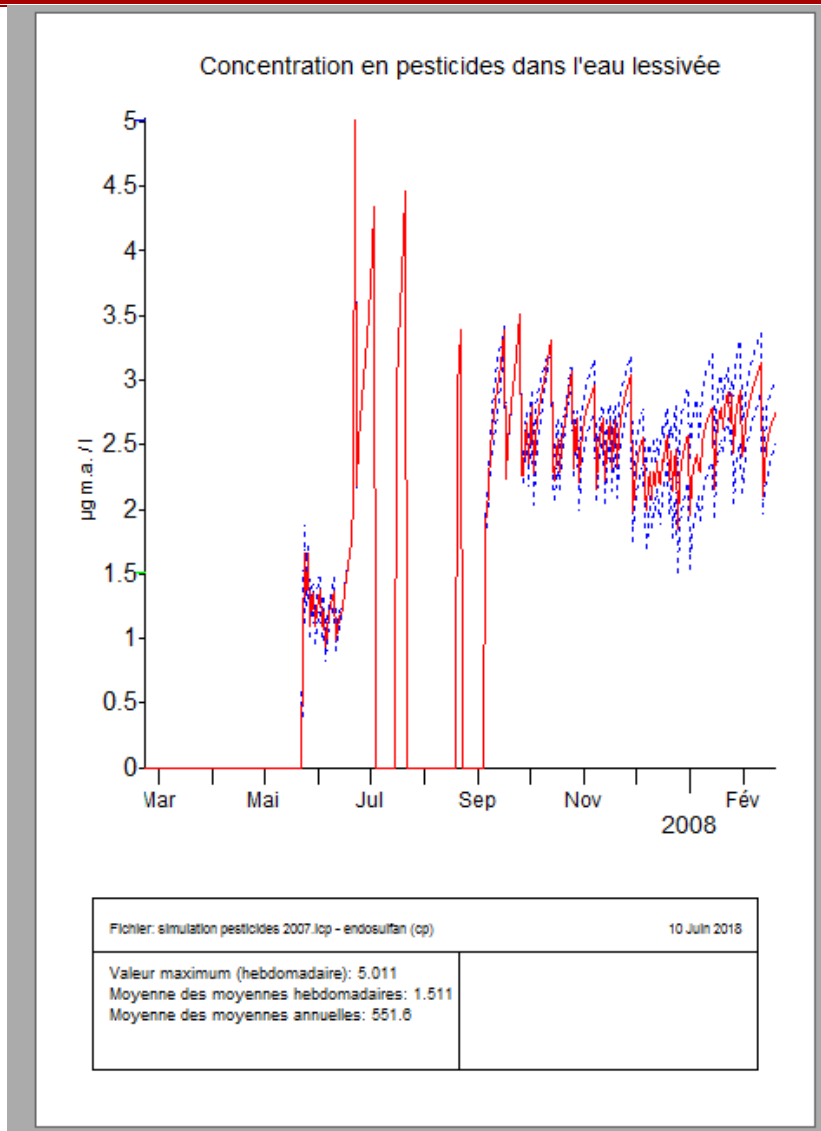


Figure 37. Simulation des concentrations de l'endosulfan lessivées et ruisselées pour un an (2007-2008)

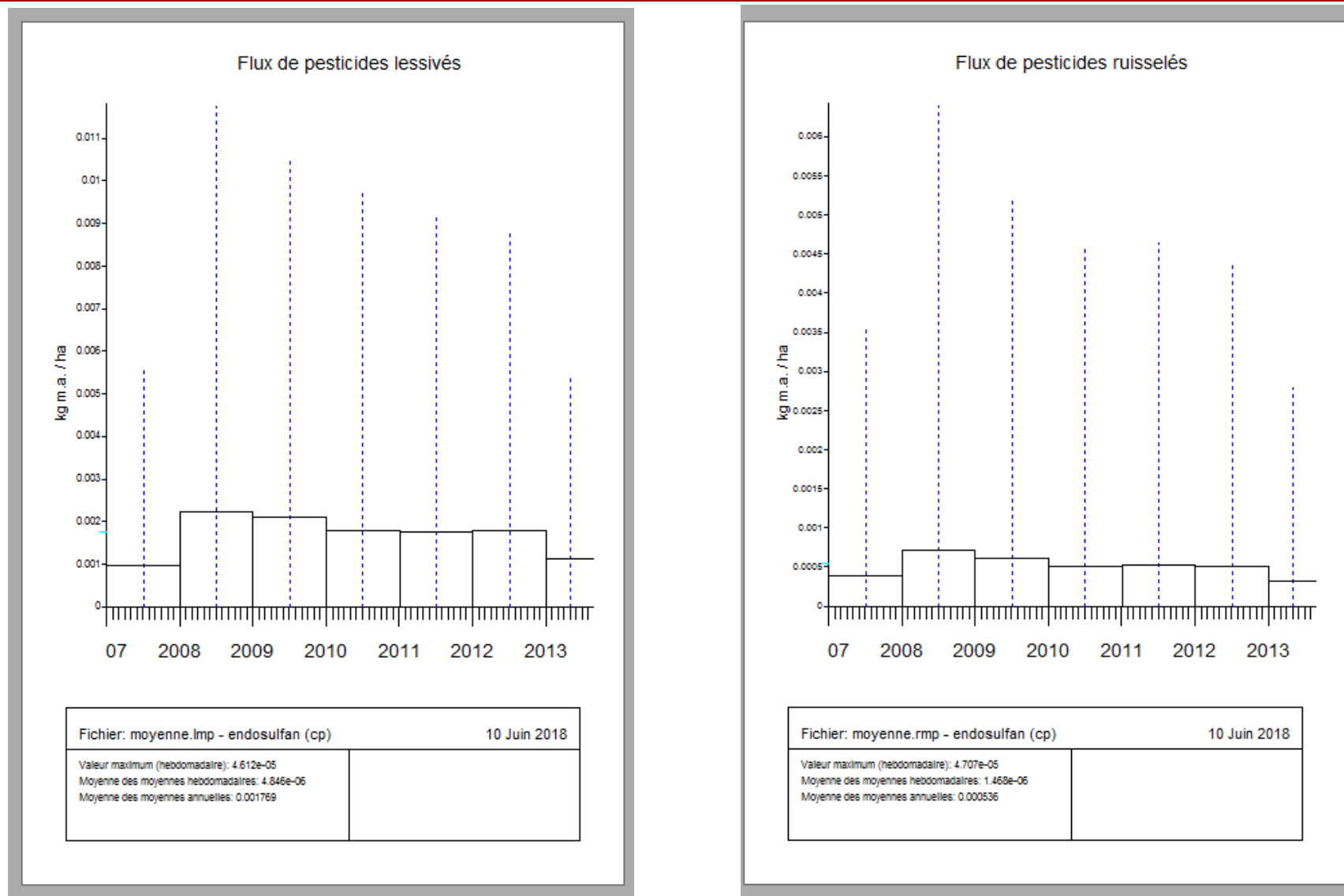


Figure 38. Simulation des flux de l'endosulfan lessivé et ruisselé pour cinq ans (2007-2013)

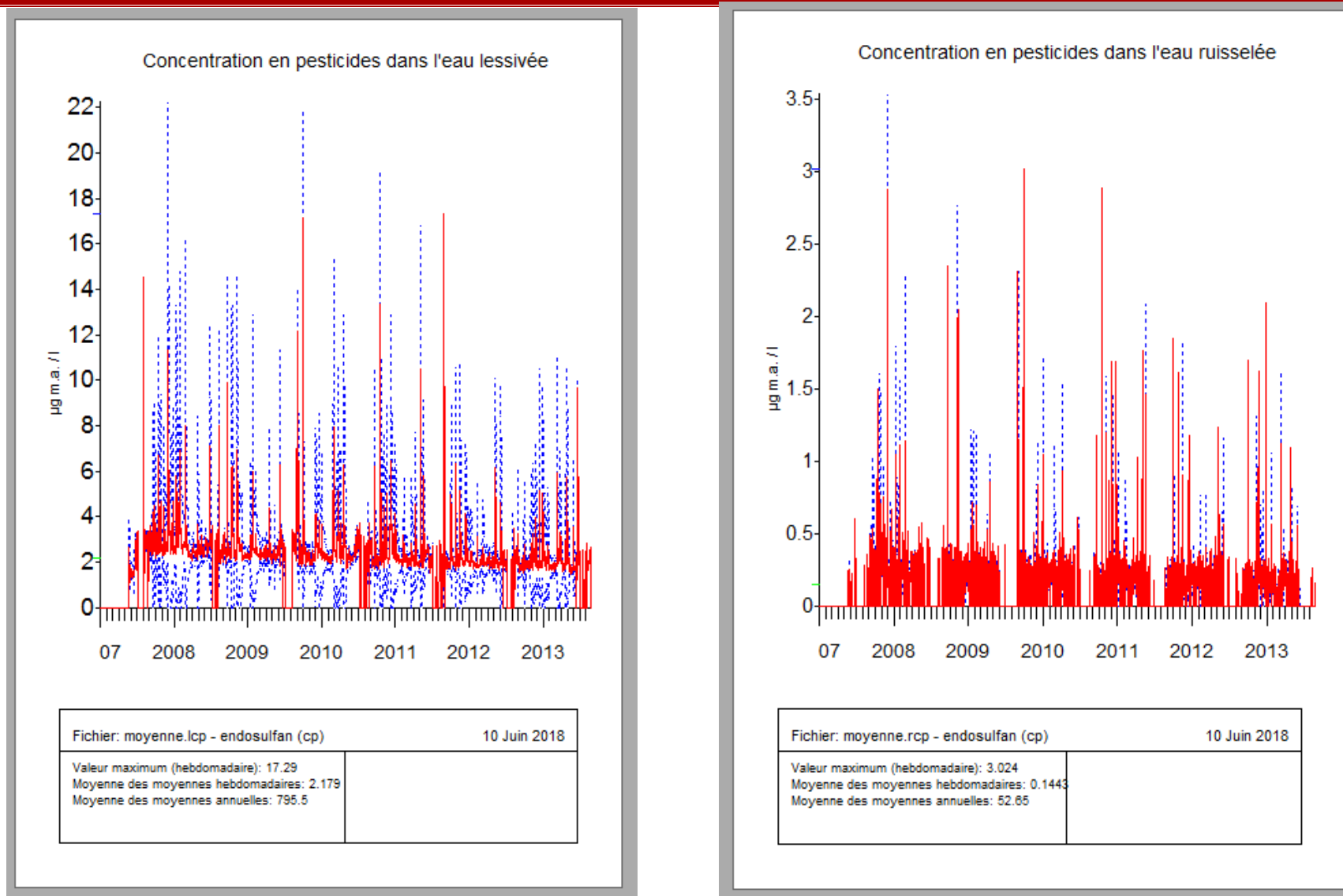


Figure 39. Simulation des concentrations de l'endosulfan lessivées et ruisselées pour cinq ans (2007-2013)

Conclusion
et
Perspectives

Les objectifs principaux de ce projet de fin d'étude en hydrogéologie étaient la maîtrise de l'utilisation du logiciel Agriflux et son application dans le périmètre irrigué de Guelma.

Par la suite, de dresser un portrait sur le devenir des fertilisants et pesticides utilisés afin d'évaluer la contamination des ressources en eaux souterraines par les nitrates et pesticides issues des pratiques agricoles.

Agriflux utilise le modèle mathématique représentant le bilan en eau (HydriFlux), concernant le bilan en azote (NitriFlux) et celui des pesticides PestFlux. Ces modèles mathématiques sont basés sur la représentation physique et mathématique des différents processus impliqués dans les cycles de l'eau, de l'azote et des pesticides. Ce sont donc des modèles mécanistes, c'est-à-dire basés sur les mécanismes.

Les pertes en azote nitrique même récemment implantée, sont régulièrement très importantes et sont évaluées à 30 kg N-NO³/ha/an en sol argileux limoneux de type vertisol, donc le risque de contamination des eaux de surfaces et souterraines est élevé. Par contre les pertes en endosulfan sont faibles et varient de 0.4 à 2.29 x10⁻³ kg/ha/an à cause la teneur élevée en matière organique du sol (MO > 5%) sur laquelle est absorbé l'endosulfan.

Dans les eaux ruisselées, les concentrations simulées en nitrates et pesticides sont très élevées, menaçants sérieusement la qualité des ressources en eaux à l'échelle du périmètre irrigué de Guelma. L'eau d'irrigation d'oued Seybouse amène aussi un apport important en azote qui n'est pas pris en compte par les agriculteurs.

Une solution à ce problème consisterait à mesurer régulièrement les concentrations en NO₃ et pesticides dans les eaux de surfaces et souterraines afin d'inciter les agriculteurs à tenir compte de cet apport dans leur fertilisation. Une prise en compte du potentiel de minéralisation de la matière organique du sol permettrait aussi de réduire les apports dans tout le secteur.

La réduction des apports de fertilisant et pesticides est une démarche nécessaire pour la mise en place d'une meilleure gestion de nos ressources au sein du périmètre irrigué de Guelma.

Références
Bibliographiques

Abdi. A, Brinis. N, Saadi. E ., (1991) : Géophysique, Hydrogéologie, hydrochimie de la vallée de la Seybouse. Région : Guelma, Bouchegouf et Moumna. Mémoire d'ingénieur d'état en géologie. Université de Badji Mokhtar Annaba. 152 p.

Aissaoui. A., (2013) : Evaluation du niveau de contamination des eaux de Barrage de Hammam Grouz de la région de Oued Athmania (Wilaya de Mila par les activités agricoles). Mémoire de magister en biologie. Université de Mouloud Mammeri de Tizi -Ouzou. 175 p.

Abiola F.A., 2000. L'endosulfan revient en grande quantité et sans respect des procédures d'homologation. Sahel IPM 15.

Agriflux2.0 : Manuel d'utilisation du logiciel d'évaluation des risques de contamination des eaux superficielles et souterraines reliés à l'épandage au champ d'engrais et de pesticides, Consulter sur site : www.hydrriad.com

AGRITOX, 2002. Endosulfan/AGREVO, Base de données sur les substances actives phytopharmaceutiques. <http://www.dive.afsa.fr/agritox/php/sa.php>

Atasoy A.D., Mermut A.R., Kumbur H., Ince F., Arslan H., Avci E.D., 2009. Sorption of alpha and beta hydrophobic endosulfan in Vertisol from southeast region of Turkey. Chemosphere 74.

Aubertot, J.N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I. and Voltz M., 2005. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Expertise Scientifique Collective INRA/CEMAGREF.

Barriuso. E, Calvet. R, Schiavon .M, Soulas. G, (1997): Les pesticides et les polluants organiques des sols. Transformations et dissipation. Etud. Gest. Sols 3/4, 279-295 (Numéro spécial).

Bayili, B., (2014) : Risques environnementaux liés à l'utilisation des pesticides dans deux agroécosystèmes à base de coton conventionnel et de coton biologique à Komplan 2 dans la commune de Dano au Burkina Faso. Mémoire de Master II de recherche (BA-MSB). Université polytechnique de Bobo-Dioulasso. 44 p.

Benmarce. K., (2007): Caractéristiques physico-chimiques et isotopiques des eaux souterraines dans la région de Guelma (N.E Algérien). Mémoire de magister en hydrogéologie, IST , Université Badji-Mokhtar Annaba, Algérie. 126 p.

Berranem. A., (2012) : Impact de l'irrigation par les eaux de la moyenne Seybouse sur les sols et les rendements des cultures. Mémoire de magister, Université Badji-Mokhtar Annaba, Algérie.115p.

Calvet. R., Barriuso. E, Bénoit. P, Charnay. M. P, Coquet Y., (2005) : Les pesticides dans le sol: conséquences agronomiques et environnementales. Editions, France Agricole, Livre 637p.

Comite Regional PHYTO., (2011) : Législations relatives à l'utilisation des pesticides à usage agricole en agriculture. Ce que le producteur doit savoir, Louvain-la-Neuve. 41p.

Débieche .T.H., (2002) : Evaluation de la qualité des eaux (salinité, azote, et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la base plaine de la seybouse N-E Algérien. Thèse pour le grade de docteur de l'université de Franche-comté. 199p.

Djeraba. M .,(1973). Etude agro-pédologique de la plaine alluviale de Guelma. Programme quadriennal 1970-1973. Opération 11.01.0.60.20.78. 86 p.

Djidel. M., (2008): Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla (Sahara septentrional, Algérie). Thèse de doctorat. Université Badji-Mokhtar Annaba, Algérie. 575 p.

FAO/WHO, 1968. Endosulfan. In: 1967 Evaluations of some pesticide residues in food, Rome, Food and Agricultural Organisation of the United Nations.

Fetter, C.W. 1993. Contaminant hydrogeology. Prentice-Hall, Inc. NJ, USA.

Kachi Nora, 2015. Impacts du périmètre irrigué sur la qualité des eaux souterraines dans le bassin versant de la Seybouse. Thèse de doctorat. Université Badji-Mokhtar Annaba, Algérie. 175 p.

Parkpian P., Anurakpongsatorn P., Pakkong P., Patrick W. H., 1998. Adsorption, desorption and degradation of α -endosulfan in tropical soils of Thailand. J. Environ. Sci. Health, B33.

Prat, M. 1982. Simulation théorique du transport de produits réactifs dans les sols. Cas de l'azote dans les relations bassin versant-rivière. Thèse de Docteur Ingénieur, Inst. Nat.

Zhou M., Li Y.C., Nkedi-Kizza P., O'Hair S.K., 2003. Endosulfan losses through runoff and leaching from calcareous gravelly or marl soils. Vadose Zone Journal 2.