

Écobilan des exploitations agricoles irriguées (périmètre du Tadla)

Lhassan KRIM ¹, Charles DEBOUCHE ² & Brahim SOUDI ³

1. INTRODUCTION

Compte tenu de ses conditions climatiques arides et désertiques (sur plus de 90% de la surface totale), le Maroc a fait de l'irrigation un choix technique incontournable et une voie privilégiée pour développer son agriculture. Ainsi, le pays s'est lancé, depuis environ un demi-siècle, dans une politique d'aménagement hydraulique et hydro-agricole qui a permis d'atteindre l'objectif escompté d'irriguer le million d'hectares.

Les zones irriguées, ainsi constituées, ont connu une intensification agricole qui a contribué à satisfaire substantiellement les besoins alimentaires croissants de la population et à promouvoir un développement économique et social dans ces régions.

Néanmoins, cette politique a engendré plusieurs impacts environnementaux négatifs pouvant, à terme, compromettre la durabilité de ces systèmes de production. En effet, l'intensification de l'agriculture dans les périmètres irrigués a été marquée par une utilisation excessive des intrants notamment des engrais azotés et une surexploitation des ressources en eau souterraines induisant ainsi une forte pollution des ressources en eaux et une salinisation des sols.

Dans le périmètre irrigué du Tadla, zone d'étude du présent travail, le problème est beaucoup plus accentué notamment en ce qui concerne la pollution azotée des nappes, la salinisation des eaux de la nappe phréatique et la dégradation de la qualité des sols sous irrigation.

¹ Département Gestion et Maîtrise de l'Eau, Institut TSMAER de Bouknadel, Maroc

² Unité Mécanique des Fluides et Environnement, Faculté Universitaire Gembloux, Belgique

³ Département des Sciences du Sol, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, B.P. 6202 Madinat Al Irfane, 10101 Rabat, Maroc
E-mail: l.krim@iav.ac.ma, debouche.c@fsagx.ac.be, b.soudi@iav.ac.ma

Ce travail s'intègre dans le cadre d'une étude visant la mise en œuvre de l'approche « écobilan » en tant qu'outil permettant d'évaluer les impacts de l'agriculture irriguée sur l'environnement. L'objectif est de développer une démarche intégrée d'éco-conseil à l'échelle de l'exploitation agricole irriguée à travers l'étude de son fonctionnement et l'analyse des paramètres permettant l'amélioration de sa productivité et la préservation de l'agri-environnement.

Cette communication a pour objet de présenter l'outil « écobilan » et la méthodologie d'adaptation de cette approche à l'exploitation agricole dans le périmètre irrigué du Tadla et d'analyser quelques résultats obtenus pour les modèles « eau » et « azote ».

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. L'écobilan, outil scientifique de l'évaluation environnementale

Parmi toutes les méthodes d'évaluation environnementale, les écobilans occupent une place de choix. Ils présentent, en effet, l'originalité d'analyser les impacts environnementaux d'un produit ou d'un procédé tout au long de son cycle de vie « du berceau jusqu'à la tombe ». Le terme écobilan se rapporte généralement à une démarche plus générale d'évaluation des impacts environnementaux (Moroncinia, 1998).

Dans une portée plus réduite, l'écobilan est « un bilan de matières et d'énergies, établi aux frontières d'un système parfaitement identifié et obtenu par la quantification ou la modélisation » (AFNOR, 1994 cité par Debouche, 1995).

L'élaboration du modèle « Écobilan » spécifique à la région d'étude s'est basée sur la méthodologie globale de l'ÉcoFerme Wallon qui est un modèle mis au point par la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux dans le contexte agri-environnemental de la région wallonne.

Ainsi et compte tenu des spécificités de la problématique agri-environnementale de la région d'étude, le modèle baptisé « Tadla-Ecobalance » prend en compte dix éléments (Tableau 1).

Le système étudié étant l'exploitation agricole irriguée et la période considérée est de 12 mois consécutifs correspondant à la campagne agricole. Le modèle « Tadla-Ecobalance » subdivise l'exploitation agricole en trois compartiments: les Cultures, les Animaux et le Sol cultivé et son environnement en quatre compartiments : l'Atmosphère, les Eaux du réseau, les Eaux de la nappe ou eaux souterraines et les Tiers (Figure 1).

Sur la base des hypothèses retenues, le modèle quantifie un total de 33 flux :

- 24 flux échangés entre l'exploitation et son environnement ;
- 6 flux échangés entre les compartiments de l'exploitation agricole ;
- 3 flux de variation de stock à l'intérieur des compartiments de l'exploitation.

Tableau 1. Éléments retenus dans le modèle Tadla-Écobalance et leurs utilités

N°	Élément	Utilité de l'élément
01	Azote	rôle dans la constitution des matières végétales et animales et en tant que fertilisant ainsi que pour son implication directe dans la pollution azotée très préoccupante actuellement au Tadla
02	Phosphore	rôle complémentaire dans la constitution des matières végétales et animales, a une influence sur l'eutrophisation des eaux de surface et rôle en tant que fertilisant
03	Potassium	retenu pour les mêmes raisons que le phosphore
04	Carbone	implication dans les rejets du dioxyde de carbone (CO ₂) et du méthane (CH ₄) et implication dans la synthèse de la matière organique
05	Calcium	déterminant dans la nutrition des plantes.
06	Magnésium	retenu pour les mêmes raisons que le calcium
07	Sodium	implication directe dans la salinisation des eaux et des sols.
08	Chlore	retenu pour les mêmes raisons que le sodium
09	Eau (H ₂ O)	rôle dans la transpiration par les cultures et les processus de production et de transfert notamment dans les transferts des sels et des nitrates et des problèmes environnementaux qui en découlent. L'eau est également retenue en temps que ressource naturelle partiellement renouvelable et rare, surtout dans les conditions méditerranéennes
10	Énergie(Eg)	implication en tant que facteur de production agricole

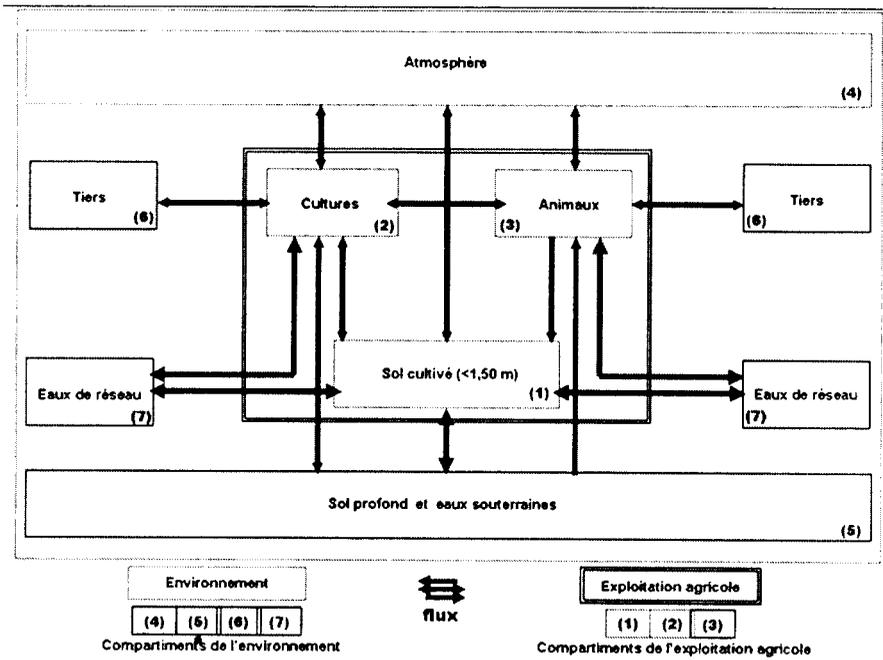


Figure 1. Schéma de l'écobilan de l'exploitation agricole irriguée dans le Tadla (Krim, 2001)

2.2. Méthodologie d'adaptation

Avant d'entamer la conception du modèle de l'écobilan dans le contexte étudié, une réflexion a été menée pour dégager les inadéquations de l'ÉcoFerme Wallon qui serviront de base pour une meilleure appréhension de l'écobilan de l'exploitation agricole irriguée du Tadla.

Ces inadéquations sont liées aux particularités climatiques, édaphiques et agronomiques et aux spécificités de la problématique agri-environnementale de la zone d'étude. Elles concernent :

- le contexte pédoclimatique,
- la pratique de l'irrigation,
- les cultures pratiquées et le devenir des productions agricoles,
- la pratique de l'élevage,
- les valeurs indicatives et forfaitaires utilisées,
- la typologie des exploitations.

La méthodologie d'adaptation du programme ÉcoFerme Wallon, pour en faire un modèle d'écobilan opérationnel dans le contexte marocain, a été basée sur trois cas:

- La capitalisation des résultats de recherche existants qui serviront de paramètres du modèle et ce, en termes:
 - des cultures pratiquées : conduite culturale et rendements,
 - de la fertilisation des cultures et des bilans de masse des éléments majeurs,
 - de l'utilisation des engrais et des pesticides et leur impact environnemental,
 - de la salinité et de la sodicité: diagnostic, causes, modélisation de la dynamique des sels, mesures préventives et mesures de réhabilitation,
 - du statut de la matière organique et de la gestion des résidus de cultures et des amendements organiques,
 - des caractéristiques et du mode de conduite de l'élevage,
 - des productions animales,
 - de la production et la gestion des effluents.
- La constitution d'un réseau d'agriculteurs représentatifs auprès desquels les données collectées serviront d'inputs pour le programme et permettront la vérification et le calage du modèle. Ce réseau est composé d'une vingtaine d'exploitations qui constituent les points de suivi écobilan (Figure 2) choisis sur la base de cinq critères présentés dans le tableau 2.
- La réalisation d'analyses au laboratoire d'échantillons de sol et d'eau et des mesures *in situ* pour appréhender la variation des flux au cours d'une période de calcul et pour mieux interpréter les résultats obtenus. Les analyses ainsi retenues sont:
 - Celles qui sont effectuées au début et à la fin de campagne agricole et qui permettent de caractériser l'état des sols des différentes parcelles et la qualité des eaux d'irrigation apportées en rapport direct avec les éléments de l'écobilan (N, P, K, C, Ca, Mg, Na, Cl). Pour cette première catégorie, on a analysé :
 - * la matière organique et le carbone organique,
 - * les bases échangeables (Na^+ , K^+ , Ca^{++} et Mg^{++}),
 - * le phosphore,
 - * l'azote minéral,
 - * l'azote total,
 - * le chlore.
 - Celles qui sont effectuées pour permettre une bonne interprétation des autres analyses. Il s'agit :
 - * du pH de l'eau et du sol,
 - * de la conductivité électrique de l'eau et du sol,
 - * de la granulométrie.

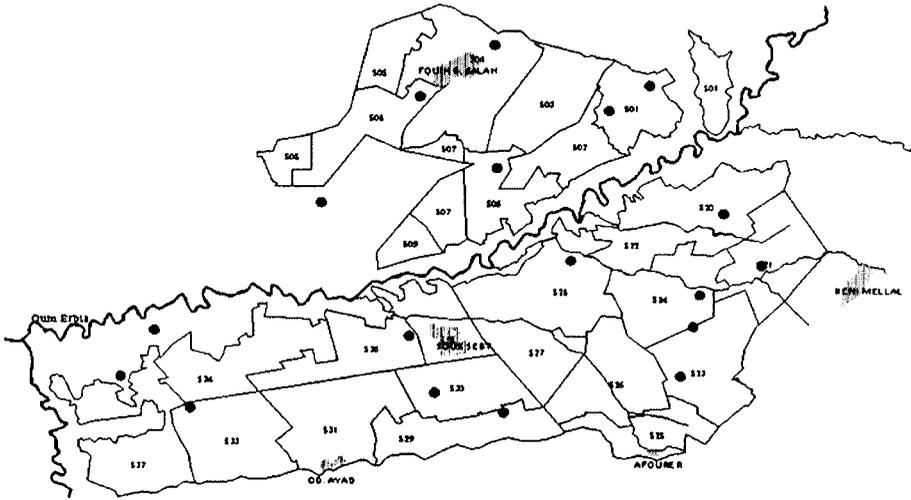


Figure 2. Localisation des exploitations du réseau de suivi Tadla Éco-Balance

Tableau 2. Critères retenus pour la constitution et la validation du réseau de suivi

Système de cultureCritères retenus.....			
	SAU	Type de sol	Type d'irrigation	Salinité des eaux et des sols
Betterave - céréales	< 5 ha	Iso-humiques	Gravitaire	Faible
fourrages				
Olivier- luzerne	Entre 5 & 20 ha	Calcimagnésiques	Localisée	Moyen
Maraîchage	> 20 ha	Autres	Autres	Élevé
Agrumes				
Élevage				

2.3. Modélisation des flux

Pour un compartiment donné, un flux entrant est une *importation*, un flux sortant est une *exportation* avec :

$$\sum \text{flux entrants} - \sum \text{flux sortants} = \text{variation du stock}$$

Un flux de l'élément X est le résultat de plusieurs composantes appelées composantes de flux. Il peut alors s'écrire sous la forme :

$$FX = \sum_k FX_k$$

avec :

FX : flux de l'élément X

FX_k : $k^{i\text{ème}}$ composante de flux du flux pour l'élément X pouvant s'écrire sous la forme $FX_{ij,k}$ avec :

i : indice du compartiment émetteur du flux

j : indice du compartiment récepteur du flux

Exemple de composante de flux de l'élément azote:

$$FN_{12,1} = \sum (S_m \times R_m \times TN)_m$$

avec :

$FN_{12,1}$: première composante du flux « Sol cultivé » (1) vers « Cultures » (2)

m : indice du produit (graines, racines...)

S_m : surface sur laquelle est élaboré le même produit (ha)

R_m : Rendement du même produit ($\text{kg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$)

TN_m : teneur en azote du même produit (kg kg^{-1})

Le bilan théorique des mouvements d'azote pour le compartiment culture par exemple est calculé selon l'équation :

$$(FN_{32} + FN_{12} + FN_{42} + FN_{52} + FN_{72} + FN_{62}) -$$

$$(FN_{23} + FN_{21} + FN_{24} + FN_{25} + FN_{27} + FN_{26}) - FN_{22} = 0$$

où :

FN_{ij} : flux d'azote quittant le compartiment émetteur i pour atteindre le compartiment récepteur j, exprimé en kg/an.

N_{22} : la variation de la quantité d'azote présente dans le compartiment culture au cours de la période considérée.

En pratique, cette équation aboutit à un résultat différent de zéro appelé écart de fermeture de l'azote pour le compartiment « cultures ». Ce principe est valable pour tous les éléments étudiés.

3. RÉSULTATS

Dans la présente communication, on présentera quelques résultats globaux obtenus pour les modèles « eau » et « sels ». Le détail est amplement étayé dans le travail de doctorat et articles de L. Krim soumis pour publication.

3.1. Flux modélisés

3.1.1. Modèle « eau » : *Water Ecobalance*

Dans le modèle « eau » il a été jugé utile de considérer deux types de flux : des « flux majeurs » et des « flux mineurs » (Figure 3).

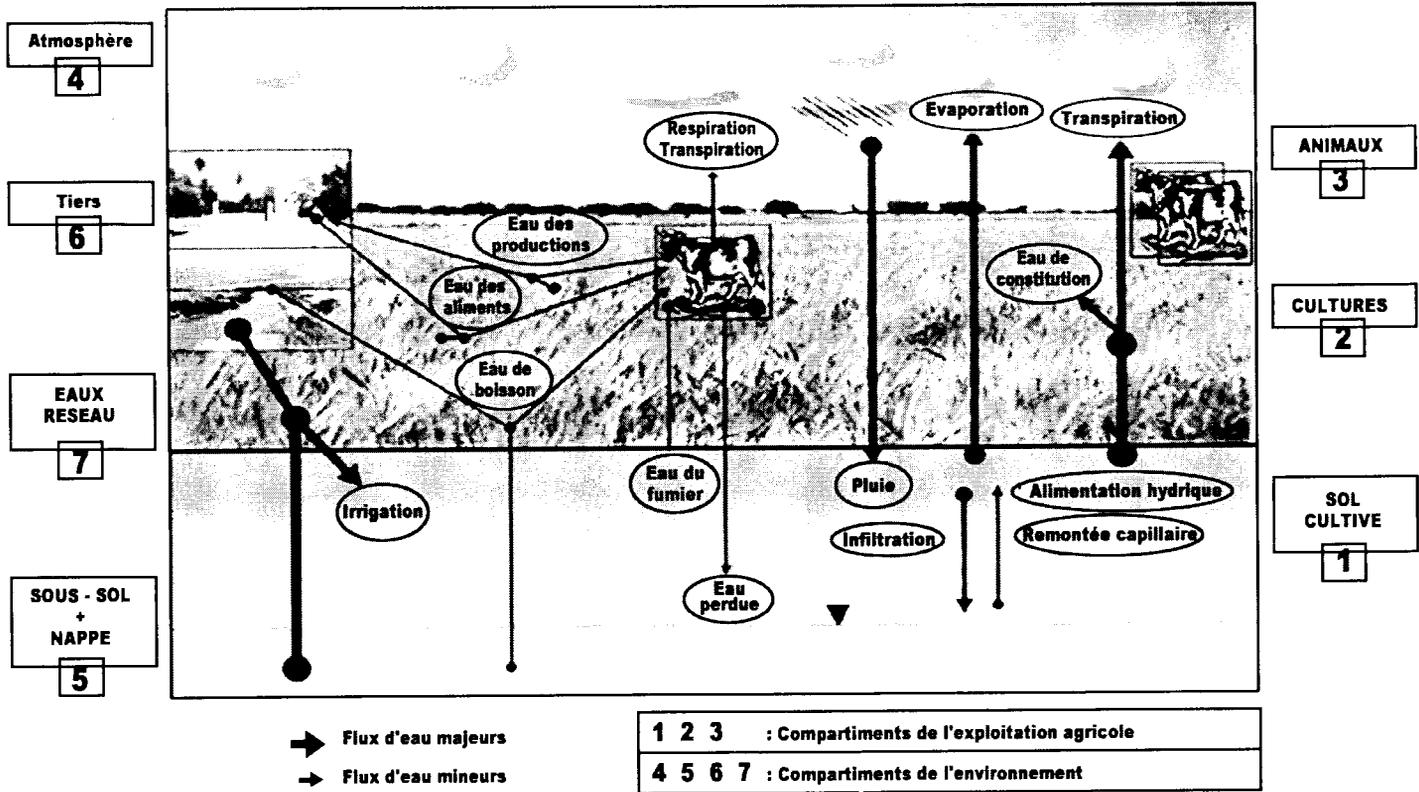


Figure 3. Schéma de l'écobilan « eau »

Les « flux majeurs » impliquent des quantités relativement importantes d'eau (des centaines de m³ par an) et sont déterminants dans la production végétale et la pollution de la nappe souterraine. Les autres flux, dits « flux mineurs », impliquent des quantités relativement faibles d'eau (des centaines de litres par an) et concernent quasiment le compartiment « animaux ». Les flux ainsi modélisés pour l'élément « eau » sont résumés dans le tableau 3.

Notons que le flux majeur n°5 et le flux mineur n°10 sont calculés comme étant des écarts de fermeture respectivement des compartiments « Sol cultivé » et « Animaux ».

Tableau 3. Désignations des flux du modèle « eau »

N°	Désignation
Flux majeurs	
1	Précipitations
2	Eaux d'irrigation
3	Évaporation à partir du sol
4	Évapotranspiration des cultures
5	Infiltration et ou Remontée capillaire
Flux mineurs	
1	Eau des productions végétales
2	Eau des productions animales
3	Eau de constitution des cultures
4	Eau pour abreuvement des animaux
5	Eau des aliments pour animaux
6	Eau du fumier épandu
7	Eau des effluents liquides perdus
8	Eau des semences fermières
9	Eau des engrais épandus
10	Respiration et transpiration animaux

3.1.2. Modèle « azote » : Nitrogen Ecobalance

En plus des processus de transformations des différentes formes d'azote dans le sol (minéralisation, humification, réorganisation, etc.), les différents flux modélisés sont résumés dans le tableau 4. Le flux de lixiviation potentielle de l'azote est calculé en tant qu'écart de fermeture du compartiment «Sol cultivé ».

Tableau 4. Désignations des flux du modèle « azote »

• Compartiment « Sol cultivé »	
Entrées	Sorties
Apport des engrais Apport du fumier	Nutrition minérale azotée Exportation de la terre collée aux betteraves
Apport des eaux d'irrigation Résidus de cultures Fixation libre	
• Compartiment « Cultures »	
Entrées	Sorties
Nutrition minérale azotée	Productions végétales principales pour les tiers
Fixation symbiotique d'azote	Productions végétales principales pour les animaux Productions végétales secondaires pour animaux
• Compartiment « Animaux »	
Entrées	Sorties
Productions végétales principales pour animaux Productions végétales secondaires pour animaux Aliments achetés pour les animaux	Productions animales Production d'effluents

3.2. Quelques indicateurs retenus

Pour démontrer l'utilité de cette approche aussi bien pour l'agriculteur que pour le gestionnaire, des indicateurs environnements ont été construits pour chaque modèle.

Pour le modèle « eau », deux indicateurs principaux ont été définis, d'une part, l'efficacité d'utilisation de l'eau par les cultures (EUC) et, d'autre part, l'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation (EUI). Ces deux indicateurs sont définis comme suit :

$$\text{EUEC} = \frac{\text{eau des productions végétales}}{\text{eau apportée au sol cultivé}} (\%)$$

$$\text{EUI} = \frac{\text{eau des productions végétales + évaporation}}{\text{eau d'irrigation apportée au sol cultivé}} (\%)$$

Pour le modèle azote, le principal indicateur retenu est le risque de lixiviation potentielle de l'azote minéral.

3.3. Résultats de flux

L'approche ainsi développée à été testée dans le réseau de suivi « écobilan » constitué de 18 exploitations enquêtées pendant deux campagnes agricoles 2002-2003 et 2003-2004. La figure 4 résume les résultats des flux d'azote obtenus dans l'une des exploitations de ce réseau.

À travers l'écobilan « Azote » les flux des nitrates en profondeur peuvent atteindre annuellement en moyenne 90 kg N par hectare (Figure 5) pouvant ainsi détériorer davantage la qualité des eaux souterraines. Les risques potentiels de lixiviation, mis en évidence, sont dus aux apports souvent excessifs par rapport aux besoins et aux taux de minéralisation de l'azote relativement élevé dans le contexte étudié.

Le bilan « Eau » a permis de juger de l'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation qui demeure globalement faible dans le contexte étudié. Les rendements réels réalisés pour les principales cultures ne représentent que 20 à 60% du rendement maximal réalisable compte tenu des quantités d'eau consommées (Figure 6).

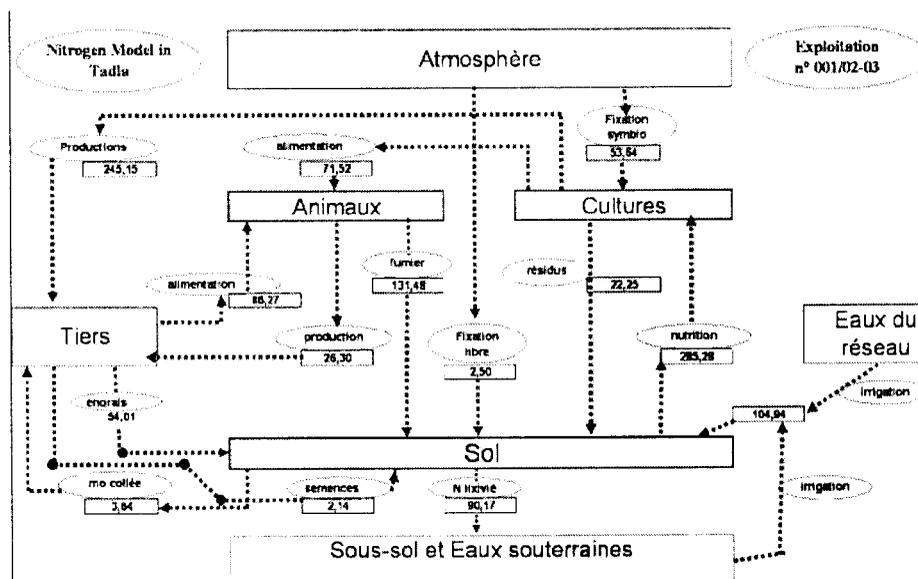


Figure 4. Étude de cas pour l'élément azote

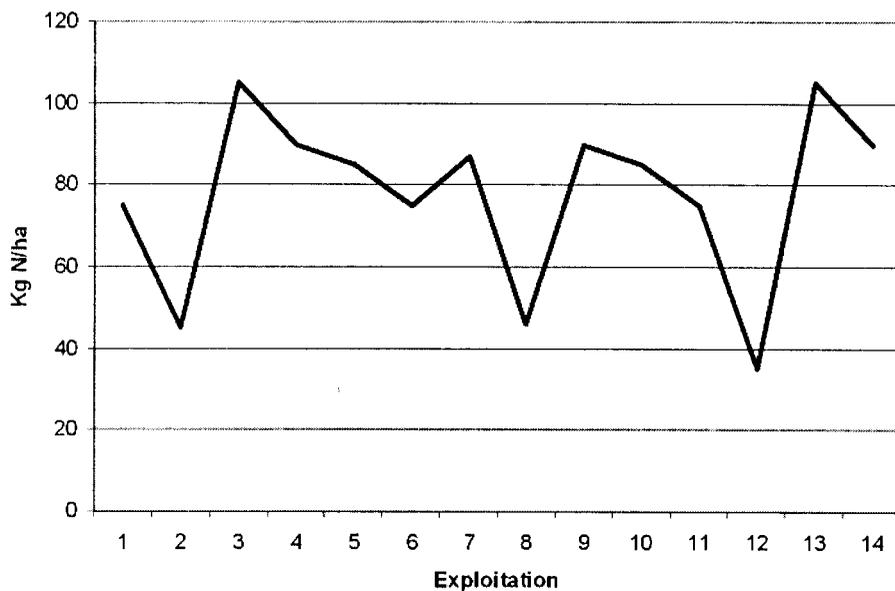


Figure 5. Flux de lixiviation potentielle de l'azote dans le réseau de suivi Tadla ÉcoBalance (kg/ha) (Campagne 2002-2003)

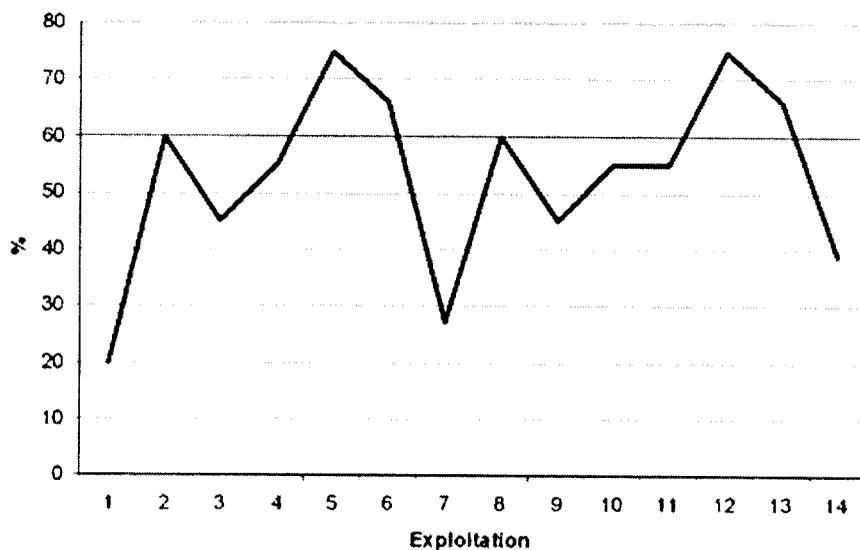


Figure 6. Rendements réels réalisés / rendements maxima réalisables pour les principales cultures compte tenu des quantités d'eau consommées (%) (Campagne 2002-2003)

4. CONCLUSIONS

L'analyse des inadéquations du modèle de ÉcoFerme Wallon et des spécificités de la problématique environnementale dans le Tadla a permis d'orienter les choix à adopter pour l'élaboration du modèle compte tenu des soucis et des priorités des décideurs.

La constitution d'un réseau de suivi sur le terrain a permis de mener des enquêtes pendant deux campagnes agricoles « 2002-2003 » et « 2003-2004 ». Ceci a permis, d'une part, d'identifier le type de données requises par le modèle indisponibles ou difficiles à collecter et de mener, d'autre part, une réflexion sur le protocole expérimental à mettre en place pour déterminer les paramètres qui permettront le calage du modèle.

Ainsi, le bilan « Azote » a permis de mettre en évidence les risques potentiels de lixiviation des nitrates pouvant atteindre annuellement en moyenne 90 kg N par hectare. L'écobilan « Eau » a permis de juger l'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation qui demeure globalement faible dans le contexte étudié.

Les rendements réels réalisés pour les principales cultures ne représentent que 20 à 60% du rendement maximal réalisable compte tenu des quantités d'eau consommées.

Les écobilans effectués dans le réseau ont permis de mettre en évidence l'intérêt de cette approche pour analyser le fonctionnement agri-environnemental de l'exploitation agricole irriguée.

Les études de cas ainsi réalisées en utilisant l'approche écobilan ont démontré l'importance des efforts à consentir en termes d'éco-conseils pour améliorer la compréhension des facteurs de la productivité agricole conservatrices vis-à-vis de l'environnement.

RÉFÉRENCES CITÉES

- Debouche C & Lambin J (1996) Environmental Assessment of the farming enterprise.
- Krim L (2001) Vers l'élaboration d'un modèle d'écobilan de l'exploitation marocaine- Cas du périmètre irrigué du Tadla. Diplôme d'Études Approfondies en Sciences Agronomiques et Ingénierie Biologique FUSA Gembloux
- Lindfors L-G *et al.* (1995) Nordic Guidelines on Life-Cycle assessment. Copenhagen. Arhus. ISBN 929120692X /222 p.

Soudi B & Chiang CN (1999) Etude de l'impact de l'intensification de la mise en valeur agricole sur la qualité des sols et des eaux dans le périmètre des Doukkala. Rapport interne

Moroncini A (1998) Stratégie environnemental des entreprises. Contexte, Typologie et mise en œuvre. Première édition. Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Normandes. 191 p. ISBN 2-88074-389-3