

## **Analyse de sensibilité paramétrique d'un modèle agro-économique de gestion de l'eau d'irrigation**

### **Auteurs :**

- Ihssan EL OUADI\* : Ingénieur d'état en agroéconomie de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Maroc, et actuellement Doctorante à l'Ecole Mohammedia d'Ingénieurs, Rabat, Maroc. Tél : +212662021630. Email : [elouadihssan@gmail.com](mailto:elouadihssan@gmail.com).
- Driss Ouazar : Professeur à l'Ecole Mohammedia d'ingénieurs, Rabat, Maroc.
- Mohamed Rachid Doukkali : Professeur à l'institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II Rabat, Maroc.
- Lahcen el Youssfi: Professeur Assistant à Ecole Supérieure technique , Université Moulay Ismail de Khénifra, Maroc.

### **Résumé**

Le présent travail a pour objectif de construire un outil d'analyse et d'aide à la décision en matière de choix de politique concernant l'allocation optimale de la ressource eau, tout en permettant une meilleure réflexion sur la question de la valorisation de l'eau par le secteur agricole en particulier. Pour ce faire, un modèle désagrégé par type d'exploitations agricoles a été développé pour la commune rurale d'Ait Ben Yacoub située à l'Est du Maroc. Ce modèle intègre des données économiques, agronomiques et hydrauliques, et permet de simuler la marge brute agricole à l'échelle de la commune en question face à des changements dans les politiques publiques et les conditions climatiques, tout en tenant compte de la concurrence pour les ressources collectives. Afin d'identifier les paramètres d'entrées du modèle qui influencent plus les résultats du modèle, une analyse de sensibilité paramétrique est réalisée, par l'approche "One-Factor-At-A-Time" de la méthode "Screening Designs ". Les résultats préliminaires de cette analyse montrent que parmi les 10 paramètres analysés, six paramètres influencent significativement la fonction objectif du modèle, il s'agit par ordre d'influence de : i) Coefficient de réponse du rendement des cultures à

l'eau, ii) Gain moyen quotidien en poids du cheptel, iii) Taux de reproduction du cheptel, iv) Rendement maximum des cultures, v) Offre en eau d'irrigation et vi) Précipitation. Ces six Paramètres accusent des indices de sensibilité variant entre 0,22 et 1,28. Il en découle des incertitudes élevées sur ces paramètres peuvent biaiser énormément les résultats du modèle d'où la nécessité d'accorder une attention particulière à leurs estimations.

**Mots clés :** eau, agriculture, modélisation, allocation optimale, Ait ben Yacoub, analyse de sensibilité paramétrique, la méthode Screening Designs, l'approche "One-Factor-At-A-Time", politiques agricoles, changement climatique.

### **Abstract**

The current work aims to build an analysis and decision support tool for policy options concerning the optimal allocation of water resources, while allowing a better reflection on the issue of valuation of water by the agricultural sector in particular. Thus, a model disaggregated by farm type was developed for the rural town of Ait Ben Yacoub located in the east Morocco. This model integrates economic, agronomic and hydraulic data and simulates agricultural gross margin across in this area taking into consideration changes in public policy and climatic conditions, taking into account the competition for collective resources. To identify the model input parameters that influence over the results of the model, a parametric sensitivity analysis is performed by the "One-Factor-At-A-Time" approach within the "Screening Designs" method. Preliminary results of this analysis show that among the 10 parameters analyzed, 6 parameters affect significantly the objective function of the model, it is in order of influence: i) Coefficient of crop yield response to water, ii) Average daily gain in weight of livestock, iii) Exchange of livestock reproduction, iv) maximum yield of crops, v) Supply of irrigation water and vi) precipitation. These 6 parameters register sensitivity indexes ranging between 0.22 and 1.28. Those results show high uncertainties on these parameters that can dramatically skew the results of the model or the need to pay particular attention to their estimates.

**Keywords:** water, agriculture, modeling, optimal allocation, Ait Ben Yacoub, parametric sensitivity analysis, the method Screening Designs, "the" One-Factor-At-A-Time"approach, agricultural policy, climate change.

## **I. Introduction**

Dans un contexte de rareté des ressources en eau, d'une sécheresse ayant pris un caractère structurel et face à une demande croissante en eau, le Maroc s'est trouvé depuis quelques années, dans l'obligation de s'engager sur la voie d'une rationalisation de l'utilisation de ses ressources hydriques afin d'en assurer la durabilité quantitative et qualitative.

Par ailleurs, une des activités les plus déterminantes dans la problématique de l'eau est l'agriculture. Si les cultures irriguées contribuent à la formation de 45% de la valeur ajoutée agricole, à 33% de l'emploi en milieu rural et à 75% des exportations des produits agricoles, celles-ci consomment 85 % des ressources en eau mobilisées et détériorent la qualité de la ressource à travers la lixiviation de nitrates et de produits phytosanitaires (Arrifi ,2012).

Eu égard à ce constat, le grand défi pour le Maroc consiste désormais à gérer efficacement et équitablement ses richesses hydrauliques dans un cadre du développement durable. Dans ce contexte alarmant, une modélisation des ressources en eau au niveau du bassin s'avère plus que jamais cruciale et constituera un outil d'analyse et d'aide à la décision appréciable afin de gérer au mieux l'allocation de ces ressources.

La présente étude est une contribution pour l'éclairage de ce type de problématiques. Elle développe un modèle agro-économique permettant une meilleure réflexion sur la question de la valorisation et de l'efficacité de l'utilisation des ressources en eau par le secteur agricole. Pour ce faire, une application pilote a été développée pour une commune rurale située à l'Est du Maroc et dénommée 'Ait Ben Yacoub '.

Comme étape préliminaire de la modélisation, une analyse de sensibilité paramétrique est réalisée, afin d'identifier les paramètres d'entrées du modèle qui influencent le plus les résultats et auxquels une attention particulière doit être accordée lors de leurs estimations.

## **II. Contexte et Objet de l'étude**

En modélisation mathématique, les paramètres d'entrée du modèle sont souvent très nombreux, et mal connus. Cependant certains de ces paramètres peuvent avoir une influence importante sur les résultats du modèle, d'où la nécessité lors de l'élaboration d'un modèle mathématique quel que soit son domaine scientifique, de chercher à comprendre le comportement du modèle vis-à-vis de ces paramètres, de la cohérence entre le modèle et le système qu'il représente et de la manière dont ses différentes parties interagissent, (Saltelli et al., 1999).

Dans ce cadre et afin d'identifier les paramètres d'entrée du modèle les plus sensibles, c'est à dire ceux pour lesquels une simple variation peut entraîner des changements considérables dans les sorties du modèle (Saltelli et al., 2000b), nous avons amené une analyse de sensibilité paramétrique à l'aide de la méthode "One Factor At A Time (OAT)" de la méthode "Screening Designs".

Cet article a pour but de répondre aux objectifs suivants :

- Evaluer la réponse du modèle aux variations des paramètres d'entrée ;
- Hiérarchiser les facteurs : voir lequel est le plus influent sur les résultats du modèle et nécessitant plus de précision ;
- Aider à simplifier le modèle en négligeant les paramètres les moins influents du modèle ;

## **III. Etat de l'art : Analyse de sensibilité paramétrique**

En général, l'analyse de sensibilité paramétrique étudie comment la variation de la sortie d'un modèle peut être attribuée aux variations des différents paramètres. Selon Kleijnen (1995), l'analyse

de sensibilité peut être considérée comme une investigation systématique de la réaction d'un modèle vis-à-vis des valeurs extrêmes de ses paramètres ou des changements drastiques dans sa structure. Si dans certains cas la structure du modèle ne peut pas être remise en question, sa sensibilité ou le degré de variation des sorties par rapport aux incertitudes de ses paramètres d'entrée est d'importance et doit être connue.

Il existe plusieurs méthodes d'analyse de sensibilité selon le domaine d'application et le niveau de complexité du système. Les trois principales utilisées sont les méthodes de criblage ou screening, les méthodes d'analyse de sensibilité locale et les méthodes d'analyse de sensibilité globale (Saltelli et al., 2004).

La méthode de 'screening' analyse qualitativement l'importance des paramètres d'entrée sur la variabilité de la réponse du modèle. L'objectif de cette méthode est, dans un premier temps, d'isoler les paramètres qui sont très influents sur les résultats et donc, de réduire le nombre de paramètres à analyser avec des méthodes plus sophistiquées et/ou plus coûteuses. Ces méthodes sont souvent appliquées dans le cas où le modèle contient un nombre considérable de paramètres d'entrée et nécessite un temps de calcul très élevé. Trois types de techniques peuvent être utilisés pour effectuer une analyse de sensibilité par cette méthode : i) One-Factor-At-A-Time, ii) Factorial Experimentation et iii) "Fractional Factorial Experiment".

La "Local Sensitivity analysis" s'attache à déterminer l'impact local des facteurs d'entrée sur le modèle. Elle repose sur le principe de calcul des dérivées partielles des fonctions de sorties par rapport aux variables d'entrée. Ces calculs se font numériquement en faisant varier les entrées du modèle dans un intervalle très restreint autour d'une valeur nominale.

La "Global SA" est une méthode quantitative basée sur l'estimation de la contribution de chaque paramètre d'entrée d'un modèle à la variance observée dans les sorties ; elle étudie aussi l'interaction entre ces différentes variables d'entrée (Ratto et al ., 2001 ; Soutter, Musy, 1999). Trois

techniques principales sont largement utilisées : Monte Carlo (MC), "Response Surface Methodology" (RSM) et "Fourrier Amplitude Sensivity Test" (FAST).

#### IV. Description de la zone d'étude

La commune rurale d'Ait Ben Yacoub est située à l'est du Maroc et relève de la province de Midel.

Elle s'étend sur une superficie égale à 48\_000 hectares et regroupe 262 exploitations agricoles dont les activités principales sont l'élevage et l'agriculture. Selon un rapport du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (MAPM) ,relatif à l'Etude du projet d'aménagement hydro-agricole des périmètres irrigués de la commune rurale d'Ait Ben Yaâcoub, la structure foncière des exploitations de cette commune se présente comme le montre le tableau 1.

**Tableau 1 : Structure foncière des exploitations agricoles**

Type d'exploitation	Nombre d'exploitation	%	Superficie (ha)
Moins de 2ha	95	36,26	164
Entre 2 et 5ha	50	19,1	228
Entre 5 et 10ha	59	22,5	519
Plus que 10ha	58	22,14	1989
Total	262	100	2900

(Source : MAPM , 2011)

Cette région est caractérisée par un climat semi-aride où l'eau est un facteur limitant, constituant ainsi une condition défavorable à une agriculture productive et compétitive. Les ressources en eau d'irrigation sont constituées, d'une part ,et principalement par les eaux de la source d'Ain Laarais qui fait partie des sources les plus importantes du bassin de la Haute Moulouya avec un débit qui peut

atteindre 245 l/s et ,d'autres part, par les eaux souterraines exploitées à travers les puits et forages creusés par les agriculteurs.

Cette commune est caractérisée par une agriculture traditionnelle basée essentiellement sur des cultures annuelles céréalières, avec la présence du pommier et de quelques cultures maraîchères d'hiver, particulièrement la pomme de terre. L'occupation des sols dans la zone d'étude se présente comme suit :

**Tableau 2 : Assolement culturel relatif à la campagne agricole 2011**

Cultures	Superficie ( ha)	% SAU assolée
Blé tendre	380,3	19,32
Blé dur	547,2	27,8
Orge	592,3	30,09
Maïs	150	7,62
total céréale	1 669,80	84,84
Luzerne	3,8	0,19
Pomme de terre	5,8	0,29
Pommier	288	14,63
Olivier	1	0,04

(Source : MAPM , 2011)

## V. Matériel et Méthodes

### 1. Description du modèle

Ce travail développe un modèle agro-économique, conçu de manière à répondre à des questions relatives à la compétitivité sur l'offre en eau, et l'allocation efficiente de cette ressource. Il s'agit d'un modèle mathématique d'optimisation non-linéaire désagrégé par type d'exploitations agricoles, optimisant la marge brute agricole à l'échelle de la commune d'Ait Ben yacoub sous contrainte de disponibilité limitée en ressources en eau et terres agricoles.

Le modèle élaboré représente la combinaison de plusieurs modèles individuels d'exploitations agricoles dans un cadre unique agrégé, dans lequel les liaisons entre les exploitations ont été définies de manière explicite. Cette approche va nous permettre de garder les spécificités micro les plus

pertinentes de l'exploitation agricole tout en optimisant l'allocation des ressources en eau à grand échelle.

La fonction objectif du modèle optimise la marge brute agricole à l'échelle de la commune d'Ait ben Yacoub. Cette marge brute inclue les marges brutes procurées de la production végétale et animale. Elle est exprimée dans le modèle de la manière suivante :

$$V\_OBJ = \sum_{farm\_T} (MB\_végétale_{farm\_T} + MB\_animale_{farm\_T}) \quad \text{Equation (1)}$$

Tel que :

V\_OBJ : La variable 'objectif' : la marge brute agricole au niveau de la commune.

MB \_ végétale : La marge brute végétale.

MB \_ animale : La marge brute animale.

Farm\_T : Ensemble homogène d'exploitations regroupées sous le nom de « Type d'exploitation ».

Le modèle intègre 3 composantes principales : hydrologique, agronomique et économique liées entre elles par des contraintes et des équations d'équilibre.

- La composante économique s'intéresse au calcul des marges brutes animales et végétales et du coût d'opportunités de l'eau. On suppose que pour chaque produit agricole les coûts de production et les prix de vente sont des paramètres exogènes, seuls le rendement agricole et la consommation en eau feront la variabilité des marges brutes végétales.

La marge brute végétale est définie dans le modèle de la manière suivante :

$$MB\_végétale_{farm\_T} = \sum_{crop} SUP_{farm\_T, CROP} X ((Ya_{CROP} X Px\_rdt_{CROP}) - \sum_{crop} coût\_production) - \sum_{crop} (V\_I\_Ha_{farm\_t.crop} X Px\_eau) \quad \text{Equation (2)}$$

Tel que :

Sup : Superficie allouée à une culture ;

Px \_ rdt : Prix de vente de la récolte d'une culture ;

Ya : Rendement par culture ;

Coût\_ production : Coût de production par hectare hors coût de l'eau (input : semence, labour, fertilisation ...);

V\_I\_Ha : Quantité d'eau d'irrigation apportée par hectare ;

Px\_eau : Prix financier de l'eau par m3 ;

Crop : Ensemble des cultures.

- La Composante hydrologique définit principalement la contrainte hydrique qui impose que les quantités d'eau d'irrigation apportées aux cultures ne doivent pas dépasser l'offre en eau d'irrigation existante. Cette offre mensuelle est estimée à 1,038Mm3 (le débit de la ressource est connu). Des règles institutionnelles qui gouvernent l'allocation de la ressource eau pour les différentes zones ont été incorporées dans le modèle, tout en incluant les droits, les prix et les restrictions imposés par les institutions en place. Les besoins en eau des cultures ont été calculés sur la base de l'évapotranspiration de référence .Celle-ci a été évaluée par la méthode de Blanney-Criddle (Doorenbos and Pruitt, 1975).

$$ETM = Kc \times Eto \quad \text{Equation (3)}$$

Avec :

- ETM : Evapotranspiration maximale ;
- Kc : Coefficient cultural dépendant de la culture et de son stade de croissance ;
- Eto : Évapotranspiration de référence, estimée par la formule de Blanney-Criddle J. (Doorenbos et Pruitt, 1975).

$$Eto = (0,46 * T + 8,3) \times P1 \times Kt \quad \text{Equation (4)}$$

- Eto : Evapotranspiration de référence en mm/mois ;
- P1 : Pourcentage journalier moyen des heures annuelles de lumière diurne ;
- T : Température moyenne en °C : paramètre ;
- Kt : Facteur dépendant de température qui vaut :  $Kt = (0,031 * T + 0,24)$ .

Cette composante inclue aussi, les équations du bilan global des échanges hydriques sol-plante-atmosphère, basées sur la relation de récurrence, traduisant la conservation de l'eau dans une couche de sol.

$$\Delta S = P+I -D-ETR \quad \text{Equation (5)}$$

Tel que :

$\Delta S$  : Quantité d'eau stockée dans le sol ;

P : Précipitations mensuelles ;

I : Quantité d'eau d'irrigation apportée à la culture ;

D : Quantité d'eau drainée ;

ETR : Evapotranspiration réelle.

- La production végétale : Le modèle définit 6 cultures, les plus répandues dans la région, et distingue entre les cultures fourragères et les cultures destinées aux marchés ou à l'autoconsommation. L'objectif de l'exploitant agricole est de maximiser la marge brute végétale qui est fonction du rendement des cultures et des coûts de production. Ce rendement est calculé sur la base de la formule établie par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) qui suppose qu'il y a un rendement maximal pour chaque culture à atteindre avec une technologie moyenne et un apport moyen en facteurs de production (semences, utilisation d'engrais, produits chimiques, semence, etc.), alors que le rendement réel pour une année peut être inférieur au maximum en cas d'un déficit hydrique (insuffisance de l'approvisionnement en eau). Un déficit survient dès que l'évapotranspiration réelle est inférieure à l'évapotranspiration maximale. Selon le bulletin de la FAO n°33 (Steduto et al,2012).

$$(1- Y_a / Y_{max}) = ky(1-ETR / ETM) \quad \text{Equation (6)}$$

Où :

YR : Rendement réel ;

YM : Rendement maximum sans aucun stress ;

ETR : Evapotranspiration réelle selon le régime d'irrigation ;

ETM : Evapotranspiration maximale sans aucun stress ;

Ky : Coefficient de réponse des rendements à l'eau.

- La production animale : Le modèle décrit l'évolution de l'effectif et du poids du cheptel sur la campagne agricole, qui commence en septembre et s'achève en fin d'août, tout en optimisant la composition des rations alimentaires. Il distingue 4 classes d'animaux : les vaches, les veaux les ovins et les caprins. La marge brute animale est égale à la somme des produits procurés de la production de lait et de la viande moins les coûts de production.

Les rations alimentaires du troupeau sont déterminées de façon endogène dans le modèle sous contrainte de satisfaire les besoins énergétiques des animaux et respecter leurs capacités d'ingestion. Cette ration est composée des produits céréaliers et fourragers de l'exploitation agricole additionnée à des concentrés achetés à un prix connu.

Le modèle calcule l'évolution du poids des animaux sur la base du gain moyen quotidien relatif à la consommation d'une ration alimentaire optimale qui couvre les besoins énergétique de l'animal. L'évolution de l'effectif du troupeau est calculée sur la base d'un taux de reproduction et de mortalité estimé. La décision à optimiser concerne la composition des rations alimentaires du troupeau qui dépend du rendement des cultures céréalières et fourragères..

En résumé, Le modèle englobe 32 paramètres exogènes et 36 variables dont 7 variables endogènes optimisées, le tableau n°3 définit l'ensemble des paramètres et variables du modèle. (Voir tableau 4 aussi)

**Tableau 3 : Liste des paramètres du modèle**

Paramètres du modèle	
Climatiques	1. Température mensuelle (en °C)
	2. Précipitation mensuelle (en mm)
	3. Pourcentage journalier moyen des heures annuelles de lumière diurne
	4. Facteur dépendant de température ( Kt)
Culturel	5. Coefficient de réponse de rendement à l'eau (KY)
	6. Rendement maximum par culture (Ym)

	7. Coefficient culturel
Exploitation	8. Assolement par type d'exploitation 9. Superficie des exploitations agricoles 10. Nombre d'exploitation par type d'exploitation
Economique	11. Coût de production hors la charge de la main d'œuvre et coût de l'eau 12. Prix de vente de la récolte (Dh) 13. Prix de location de l'eau (Dh / m3)
Elevage	14. Coût d'élevage par type d'animal 15. Nombre d'animaux par type d'exploitation 16. Prix de la vente du lait (Dh / l) 17. Prix d'achat des concentrés 18. Valeur énergétique des cultures UEF 19. Valeur énergétique des concentrés 20. Valeur d'encombrement fourragère par culture 21. Taux de substitution 22. Capacité d'ingestion journalière par type d'animaux 23. Besoin énergétique journalier par type d'exploitation 24. Taux de mortalité par type d'animaux 25. Taux de reproduction par type d'animaux 26. Gain moyen quotidien du poids(GMQ) 27. Prix de vente de la viande par kg 28. Poids du cheptel en début de la campagne agricole 29. Quantité de lait produite par vache et par jour 30. Coefficient de proportionnalité entre Rendement du produit principal et sous produit 31. Taux de Matière sèche des cultures fourragères
hydrique	32. Offre mensuelle en eau d'irrigation

Tableau 4 : Liste des variables endogènes optimisées

**Variables endogènes de décision**

1. Variable objective : Marge brute agricole à l'échelle de la commune
2. Marge brute animale par type d'exploitation
3. Marge brute végétale par type d'exploitation
4. Quantité d'eau d'irrigation apportée aux cultures
5. Evapotranspiration réelle par culture

6. Rendement réelle par culture

7. La composition des Rations alimentaires : Quantité de fourrage +  
Quantité de concentré acheté

---

## 2. Approche utilisée pour l'analyse de sensibilité paramétrique du modèle

Dans le but d'analyser la sensibilité paramétrique du modèle, et plus précisément d'identifier les entrées qui contribuent le plus à la variabilité des résultats du modèle et auxquelles une attention particulière doit être accordée lors de leurs collectes sur le terrain ou leurs estimations, nous avons utilisé l'approche OAT de la méthode "Screening Designs". Ce choix est basé sur le fait que son utilisation est assez aisée dans les modèles possédant de nombreux paramètres d'entrée, comme c'est le cas de ce modèle.

La méthode utilisée consiste à modifier alternativement les paramètres objet des simulations dans un intervalle de variation adéquat. Ce dernier est déterminé pour chaque paramètre en fonction de son intervalle de définition et d'incertitude. Un total de 55 simulations a été effectué. Chaque simulation ne prend en compte que la modification d'une seule entrée par rapport à la globalité des paramètres du modèle. L'effet de chaque variation opérée est analysé au niveau des sorties sélectionnées comme objet d'analyse.

Le modèle englobe 32 paramètres dont dix présentent des incertitudes d'estimation élevées d'où le choix de mener une analyse de sensibilité paramétrique sur ces derniers. Ces paramètres sont classés en quatre catégories, comme le montre le tableau 5.

---

Tableau 5 : Liste des paramètres objet de l'analyse de sensibilité paramétriques

---

Les classes	Paramètre objet de simulation
1. Les paramètres climatiques	Précipitation(P) Offre en eau d'irrigation

2. Les paramètres culturels	Coefficient de réponse du rendement à l'eau (Ky) Rendement max par culture (Ymax) Coefficient cultural (Kc)
3. Les paramètres économiques :	Prix financier de l'eau ( de location)
4. Les paramètres relatifs à l'élevage	Taux de mortalité (Tx-M) Taux de reproduction par an (Tx-R) Gain moyen quotidien de poids (GMQ) Production moyenne du lait par vache laitière (prod_lait)

Quatre sorties de modèle feront l'objet d'analyse de sensibilité :

1. Fonction objectif : la marge brute agricole à l'échelle de la commune ;
2. La marge brute animale à l'échelle de la commune ;
3. La marge brute végétale à l'échelle de la commune ;
4. Quantité d'eau d'irrigation apportée aux cultures irriguées.

Les résultats du modèle sont traités de la façon suivante : L'effet de chaque variation de paramètre d'entrée autour de son intervalle de variation produit 5 valeurs, pour chacune des 4 sorties retenues. De ces cinq valeurs, celle produisant la plus grande variation au niveau de la sortie en question est retenue pour évaluer la sensibilité de modèle vis-à-vis de ce paramètre. Cette sensibilité est évaluée par le calcul d'un Indice de Sensibilité et par un pourcentage de variation. L'indice de sensibilité retenu est exprimé de la manière suivante :

$$IS = (S2 - S1 / Smoy) / (E2 - E1 / Smoy) \quad \text{Equation (7)}$$

Où

IS : Indice de sensibilité de la sortie objet de l'analyse de sensibilité ;

E1 : Valeur basique du paramètre testé ;

E2 : Valeur testée ;

Emoy : Moyenne entre E1 et E2 ;

S1, S2 : Respectivement les sorties correspondant à E1 et E2 ;

Smoy : Moyenne entre S1 et S2.

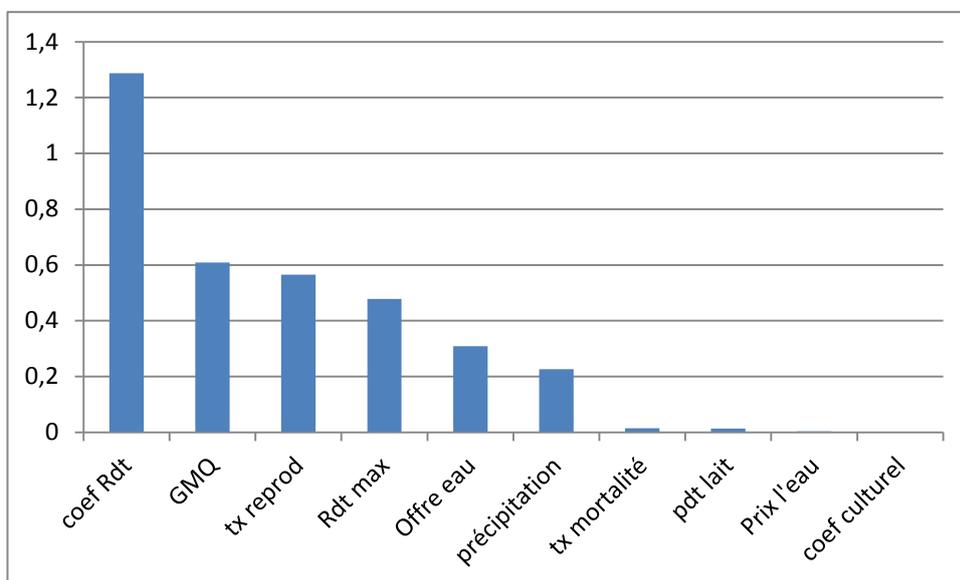
Cet indice permet d'avoir une base quantitative pour exprimer la sensibilité des sorties du modèle vis-à-vis des paramètres d'entrée. Un indice de sensibilité égal à 1 indique que le taux de variation d'un paramètre donné entraîne le même taux au niveau des sorties. Une valeur négative indique que les entrées et les sorties varient en sens inverse et plus grand est l'indice en valeur absolue plus grand est l'impact qu'un paramètre donné pourra avoir sur une sortie spécifique.

En modifiant les entrées du modèle dans leurs intervalles de variation, plusieurs d'entre elles produisent des variations non négligeables au niveau des sorties considérées. Dans le cadre de cette analyse de sensibilité, seules les entrées produisant des changements de 0,2 % minimum sont prises en considération.

## VI. Résultats et analyses

### 1. Sensibilité de la variable « marge brute agricole à l'échelle de la commune » :

Figure 1 : indices de sensibilité relatifs à la variable « marge brute agricole globale »



La marge brute agricole globale correspond à la somme de la marge brute animale et végétale. Comme illustré à la figure 1. Six paramètres influencent significativement cette sortie, il s'agit par ordre d'influence de : i) Coefficient de réponse du rendement des cultures à l'eau, ii) Gain moyen

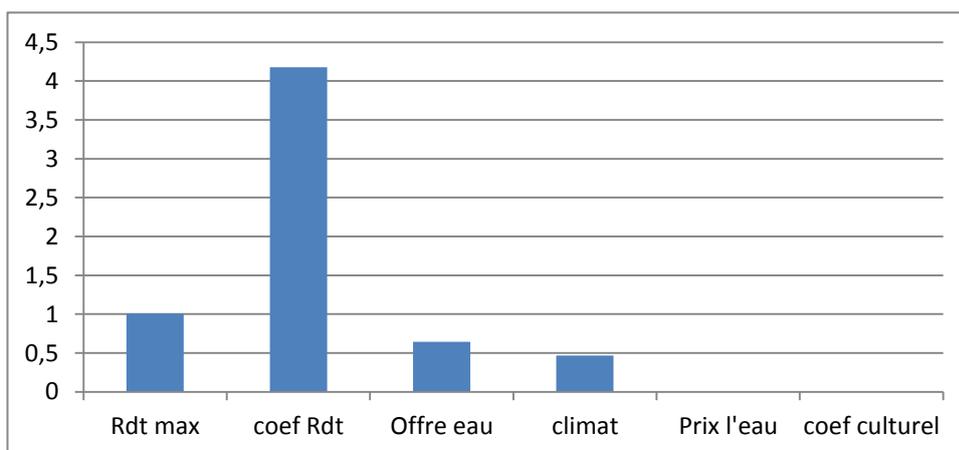
quotidien en poids relatif au cheptel, iii) Taux de reproduction du cheptel, iv) Rendement maximum des cultures, v) Offre en eau d'irrigation et vi) Précipitation mensuelles. Ces six paramètres accusent des indices de sensibilité variant de 0,22 à 1,28.

Ce résultat montre que des incertitudes élevées sur ces six paramètres peuvent biaiser énormément les résultats du modèle.

## 2. Sensibilité de la variable « marge brute végétale à l'échelle de la commune »

Les résultats de cette analyse montrent que le paramètre KY « coefficient de réponse du rendement des cultures à l'eau » présente l'indice de sensibilité le plus élevé suivi respectivement des paramètres : rendement maximum relatif à chaque culture, offre en eau d'irrigation et précipitations mensuelles, alors que les paramètres prix de l'eau et coefficient culturel présentent des indices de sensibilité très faibles. La figure 2 illustre les résultats de cette analyse.

**Figure 2 : indice de sensibilité relative à la variable « marge brute végétale »**



Le coefficient de réponse du rendement des cultures à l'eau met en rapport la baisse du rendement relatif  $(1-Y_a/Y_{max})$  et le déficit de l'évapotranspiration relative  $(1-ET_a/ET_m)$ . Les valeurs de KY considérées dans ce modèle correspondent aux valeurs présentées dans le bulletin de la FAO n°66, elles varient entre 0,9 et 1,2. La variation de ce coefficient dans l'intervalle  $-40\%$  et  $+40\%$  induit

des changements allant de + 65 % à - 82 % sur la marge brute végétale, d'où la nécessité d'accorder une importance particulière à l'estimation de ce paramètre (Voir figure 2).

Le rendement maximum d'une culture correspond au rendement atteint dans des conditions agronomiques réelles où l'eau et les autres facteurs de production sont optimaux, accompagné d'un bon niveau d'aménagement des cultures et de gestion de l'eau. Une variation de ce paramètre dans l'intervalle de -90 % à + 50 % produit des marges brutes végétales allant de -50 % à + 49 %.

Le modèle élaboré simule les marges brutes agricoles sous contrainte d'assolements culturels fixes. En cas de changement du prix de l'eau, le modèle optimisera les marges brutes tout en gardant les mêmes assolements. Dans un prochain travail, cette contrainte sera enlevée afin que le modèle puisse s'adapter en optimisant ces choix d'assolements culturels. Donc il est clair que le paramètre « prix de l'eau » aura une grande influence sur les résultats du modèle une fois le choix des assolements culturels optimisé.

### **3. Sensibilité de la variable marge brute animale**

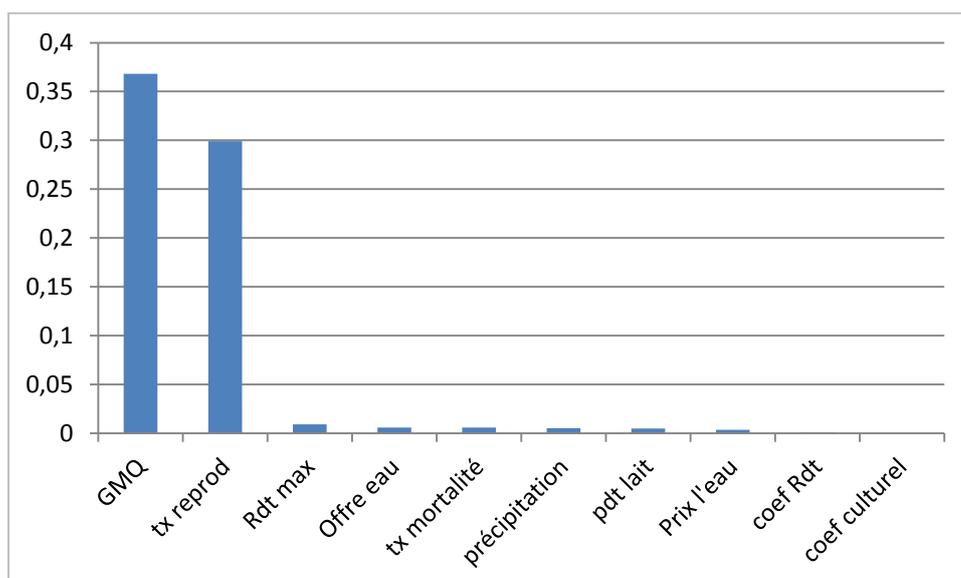
Parmi les 10 paramètres analysés, seuls les paramètres suivants : le gain moyen quotidien en poids relatif au cheptel et le taux de reproduction du cheptel relèvent des indices de sensibilité absolus élevés respectivement de l'ordre de 0,39 et 0,3. Une variation dans l'intervalle de - 20 % et +20 % du paramètre QMG produit des changements de la marge brute animale allant de - 10 % à + 19%.

Selon les résultats des simulations, les paramètres prix de l'eau et offre en eau d'irrigation n'ont pas une influence significative sur cette variable, cela peut être expliqué par le fait que :

- La production animale ne consomme pas une quantité élevée d'eau donc les coûts de production liés à la consommation d'eau restent faibles.
- Dans le modèle la variable « effectif du cheptel » est calculée de façon exogène sur la base d'un taux de reproduction et de mortalité des animaux estimés. Dans le cas où cette variable sera optimisée (objet du prochain travail), en introduisant la possibilité d'acheter des

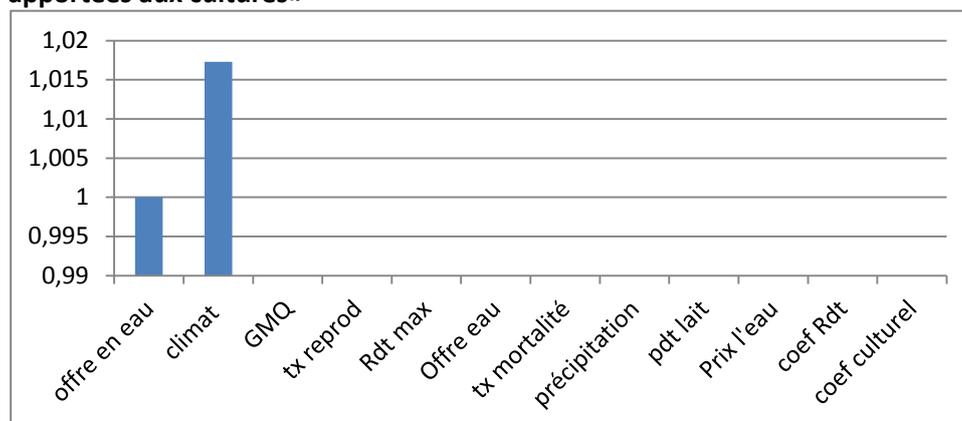
animaux pour orienter l'activité de l'exploitation agricole vers l'élevage, ces 2 paramètres auront un impact significatif sur les résultats du modèle (figure 3).

**Figure 3 : Indices de sensibilité relatifs à la marge brute animale**



**4. Sensibilité de la variable «quantités d'eau d'irrigation apportées aux cultures » :**

**Figure 4 : Indices de sensibilité relatifs à la variable « quantités d'eau d'irrigation apportées aux cultures»**



La quantité d'eau d'irrigation apportée aux cultures est influencée par la variation de 2 paramètres : Offre en eau d'irrigation et Précipitations mensuelles.

Les résultats de cette simulation sont présentés dans le tableau 6.

**Tableau 6 : Résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres « offre en eau d'irrigation et précipitation », sur la sortie « quantités d'eau d'irrigation apportées aux cultures ».**

	Simulations	Variation simulée	Quantité apportée aux cultures en Mm3	Taux de Variation	Indices de sensibilité
Offre en eau d'irrigation	sim 1	20%	1,24	19,42	0,97
	sim 2	40%	1,43	37,754	0,95
	sim 3	60%	1,62	56,097	0,95
	sim 4	80%	1,81	74,42	0,95
Précipitations mensuelles	Sim1	-30%	1,038	0	0
	sim 2	-10%	1,038	0	0
	sim 3	20%	1,038	0	0
	sim 4	50%	1,01	-2,36	-0,13
	sim 5	100%	0,96	-6,94	-0,11
	sim 6	150%	0,86	-16,93	-0,21

Il ressort de ce tableau que le paramètre « offre en eau d'irrigation » présente des indices de sensibilité très proches de 1 ce qui indique que le taux de variation de ce paramètre entraîne le même taux au niveau de la sortie « consommation en eau d'irrigation », ce qui montre que l'eau est très insuffisante. Par contre le paramètre « précipitations mensuelles » présente des indices de sensibilité négatifs allant de -0,11 à -0,21 et toute augmentation de ce paramètre supérieure à 50 % engendre une diminution de la demande en eau d'irrigation.

### V.I.I Conclusion

L'analyse de sensibilité paramétrique du modèle agro-économique de gestion de l'eau développé dans cette étude, montre effectivement que les paramètres du modèle n'ont pas tous la même influence sur les sorties du modèle. Certains sont plus importants que d'autres, c'est-à-dire ceux pour

lesquels une petite variation peut provoquer des changements considérables sur les sorties du modèle.

En effet, selon les résultats de cette analyse, la variable endogène « quantité d'eau d'irrigation apportée aux cultures » est influencée par la variation de 2 paramètres : Offre en eau d'irrigation et Précipitations mensuelles. Le paramètre offre en eau d'irrigation présente des indices de sensibilité très proches de 1 ce qui indique que le taux de variation de ce paramètre entraîne le même taux au niveau de la sortie analysée, ce qui montre que l'eau est très insuffisante et donc présente un facteur très limitant aux développements agricoles de cette zone. D'où l'intérêt de mener une réflexion approfondie sur la valorisation et la bonne gestion de cette ressource très limitée. Ce résultat justifie aussi clairement le choix de cette commune comme étude de cas du modèle élaboré.

Cette analyse de sensibilité montre aussi que la fonction objectif du modèle « La marge brute agricole globale de la commune » est influencée significativement par six paramètres .Il s'agit par ordre d'influence de: Coefficient de réponse du rendement des culture à l'eau, Gain moyen quotidien en terme de poids relatif au cheptel, Taux de reproduction du cheptel, Rendement maximum des cultures, Offre en eau d'irrigation et Précipitation. Ces six paramètres accusent des indices de sensibilité allant de 0,22 à 1,28. Donc des incertitudes élevées sur ces six paramètres peuvent biaiser énormément les résultats du modèle. Par contre quatre paramètres présentent des indices de sensibilité faibles voir nuls, il s'agit de : taux de mortalité du cheptel, coefficient culturel et production moyenne du lait par vache laitière.

Enfin, le paramètre prix financier de l'eau présente un indice de sensibilité faible car l'eau d'irrigation est très limitée dans cette région et donc la part des coûts de production liés à la consommation de l'eau d'irrigation par rapport à l'ensemble des coûts de production reste très faible. De plus, le prix économique de l'eau est très élevé et donc quel que soit le prix simulé, le modèle cherchera à optimiser les rendements agricoles en satisfaisant la demande en eau des cultures sous contrainte d'offre en eau limitée. Ce raisonnement est erroné car i) les assolements sont fixes dont le modèle et

ii) le modèle en question ne prend pas en considération la contrainte budgétaire de l'agriculteur et suppose que l'agriculteur est prêt à payer n'importe quel prix pour accéder à cette ressource rare, ce qui n'est pas vrai. Dans un prochain travail, et afin de capter l'ensemble des contraintes réelles auxquelles est confronté l'agriculteur, le modèle sera calé en utilisant des méthodes adaptées à ce genre de problème. Une fois fait, le paramètre prix financier de l'eau aura une importante influence sur les résultats du modèle, car toute variation de ce paramètre va amener le modèle à valoriser le mètre cube d'eau en optimisant ses choix d'assolement culturel.

## Bibliographie

- Arrifi A., 2012. Les ressources en eau et l'irrigation au Maroc : contraintes et alternatives. Exposé présenté dans le cadre de la Conférence '*Conférence on Desalination and sustainability*'. Casablanca. Maroc 1 -2 Mars 2012.
- Doorenbos J., Pruitt W.O., 1975. Food and Agriculture Organization (Rome, Italia) - *Rome [Italy]: FAO irrigation and drainage paper No. 24.*
- Kleijnen JPC., 1995. Sensitivity analysis and related analyses: a survey of statistical techniques. *Netherlands: School of Management and Economics, Tilburg University, 24 p.*
- Ministère de l'agriculture et de pêche maritime. 2011. Rapport relatif à l'Etude du projet d'aménagement hydro-agricole des périmètres irrigués de la commune rurale Aït Ben Yaâcoub. Novec.
- Ratto M., Tarantola S., Saltelli A., 2001. Sensitivity analysis in model calibration: GSA-GLUE approach. *Comput. Phys. Commun.* 136 (3), p. 212–224.
- Saltelli A., Chan K., and Scott M. 2000b. Sensitivity Analysis. Probability and Statistics series. New York: John Wiley, 475 p.

- Saltelli, A., Tarantolla, S., Campolongo, F. and Ratto, M., 2004. Sensitivity analysis in practice. John Wiley and Sons, Chichester, United Kingdom, 219 pp.
- Saltelli A., Tarantola S. and Chan KPS., 1999. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model-output.
- Soutter M., Musy A., 1999. Global sensitivity analysis of three pesticide leaching models using a Monte Carlo Approach. *Trans. ASAE* 43 (4), p. 883–895.
- Steduto and al., 2012. Food and Agriculture Organization (Rome, Italia): FAO Irrigation and Drainage Paper 66. *Yield response to water*, Rome. Ayers.