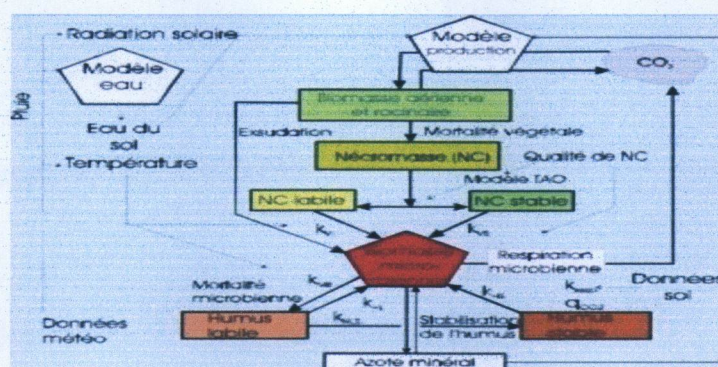




Département : Productions végétales
Graduation : Quatrième année

Polycopie de cours

Module : Enquête et modélisation



Dr.LATATI Mourad

Table des matières



Chapitre 1: Généralités sur la modélisation.....4

1.1. Définition de la modélisation.....5

1.2. Utilisation de la modélisation dans le domaine de la biologie.....6

1.3. Classification des modèles.....8

1.3.1. Classification en fonction de la forme.....8

1.3.2. Classification mathématique.....9

1.4. Importance de la modélisation13

Chapitre 2:Les étapes de la modélisation mécaniste.....15

2.1. Formulation du modèle.16

2.1.1. Formulation qualitative.....18

2.1.2. Formulation quantitative.....18

2.2. Calibration du modèle.....19

2.3. Validation du modèle.....21

2.4. Teste de sensibilité23

2.5. Couplage du modèle.....24

Chapitre 3: Modélisation des cycles de carbone et de l'azote dans le système de production végétale.....29

3.1. Généralités sur le cycle du carbone.....30

3.2. Généralités sur le cycle de l'azote.....	31
3.3. Modèles de décomposition.....	31
3.3.1. Modèle linéaire.....	32
3.3.2. Modèle non linéaire.....	32
3.4. Le modèle MOMOS	33
3.4.1. Structure du modèle MOMOS.....	33
3.4.1.1. Formulation qualitative du modèle MOMOS.....	33
3.4.1.2. Formulation quantitative du modèle MOMOS.....	35
3.4.2. Calibration et validation du modèle MOMOS.....	37
3.4.3. MOMOS, modèle centré sur la biomasse microbienne.....	39
3.4.4. Application du modèle MOMOS dans le système légumineuse-céréale.....	39
3.5. Modèle STICS.....	42
3.5.1. Historique et évolution du modèle STICS.....	42
3.5.2. Paramètres et domaine de validation.....	43
3.5.3. Points de force et de robustesse du modèle STICS.....	44
3.5.4. Validation du modèle STICS sur les systèmes de cultures innovantes.....	47
3.5.4.1. Contexte scientifique : culture durable et systèmes innovants.....	47
3.5.4.2. Importance des modèles de sol-culture dans l'étude de durabilité des systèmes de cultures.....	48
3.5.4.3. Validation de STICS sur les systèmes de cultures diversifiés.....	48

3.5.4.4. Calibration du modèle STICS sur les cultures biologiques.....	49
3.5.4.5. STICS et raisonnement de la fertilisation azotée en systèmes de cultures intercalaire à base de légumineuses.....	50
3.6. Modèle BROWSE et évaluation des risques d'application des pesticides sur la santé humaine.....	52
3.6.1. Contexte générale sur les risques causés par l'utilisation des pesticides.....	52
3.6.2. Application des pesticides et santé humaine.....	53
3.6.3. Place des approches de modélisation dans l'évaluation des impacts d'utilisation des pesticides sur santé humaine.....	54
3.6.4. Utilisation du modèle BROWSE dans l'évaluation de l'exposition de la santé humaine aux risques de l'application de pesticides.....	54
3.6.5. Présentation du modèle BROWSE.....	55
3.6.5.1. Objectif du modèle BROWSE.....	55
3.6.5.2. Paramètres d'entrés du modèle BROWSE.....	57
3.6.5.3. Paramètres sortie du modèle BROWSE.....	57
3.7. Modèle CROPSYST et simulation du fonctionnement des systèmes de culture.....	59
3.7.1. Généralités sur le modèle CropSyst.....	59
3.7.2. Description du modèle CropSyst.....	60
3.7.3. Paramètres d'entrée et variables de sortie du modèle CropSyst.....	64
3.8. Récapitulatif sur le domaine de calibration et validation des modèles biophysiques... mécanistes (e.g. STICS, BROWSE, MOMOS et CROPSYST)	67

3.8.1. Potentiel des modèles biophysiques mécanistes.....	68
3.8.2. Principe et précaution de simulation par les modèles mécanistes.....	68
3.8.3. Principe de calibration des modèles.....	68
3.8.4. Matrices d'équation et variables décrivant les systèmes de culture sur les modèles mécanistes.....	69
Chapitre 4 : Enquête agricole.....	70
4. Enquête agricole.....	71
4.1. Modes de recueil de l'information agricole.....	71
4.2. Généralités sur les enquêtes agricoles.....	72
4.2.1. Etapes de la réalisation d'une enquête agricole.....	72
4.2.1.1. La préparation et la planification d'une enquête.....	72
4.2.1.2. La conception du guide d'entretien (questionnaire)	78
4.2.1.3. La collecte des réponses.....	80
4.2.1.4. Les traitements des données de l'enquête agricole.....	80
4.3. Les différents types d'enquêtes statistiques agricoles.....	82
4.3.1. Recensement agricole.....	82
4.3.2. Enquête par sondage.....	83
4.3.2.1. Enquête par sondage agricole non probabiliste	83
4.3.2.1. Enquête par sondage agricole probabiliste	83

4.4. Exemple pratique d'un questionnaire dédié pour une enquête agricole.....85

4.4.1. Contexte et objectif de l'étude.....85

4.4.2. Structure d'un questionnaire (cas pratique).....86





Chapitre 1: Généralité sur la modélisation

Introduction

La complexité des différentes interactions entre le biotope et la biocénose dans un système biologique se traduit généralement par l'occurrence et l'intensité des processus et mécanismes susceptibles de clarifier chaque transfert entre l'ensemble des compartiments de ce système.

De plus, de nombreux systèmes que l'on étudie dans les sciences comme la physique, la chimie, la biologie, l'agronomie, l'économie, etc..., sont (en première approximation) des systèmes déterministes ; cela signifie que l'évolution du système au cours du temps est complètement déterminée par son état à un instant donné. La conception des modèles est devenue une nécessité stratégique afin d'étudier et d'explorer le comportement du système biologique.

La modélisation occupe aujourd'hui une place conséquente grâce au développement de l'informatique, elle permet d'appréhender des échelles variées ; modélisation de la plante, du peuplement végétal, de la parcelle agricole, et de quantifier des relations fonctionnelles entre les différents éléments du système, décrits à des degrés variés et fourni des explications des mécanismes régissant les systèmes étudiés.

1.1. Définition de la modélisation

- a) En **littérature**, on entend généralement par modèle ce qui est donné comme exemple, ce qu'on reproduit par imitation, ou la représentation elle-même de ce qu'on reproduit.
- b) En **science**, un modèle est une abstraction qui simplifie la réalité en ignorant de nombreuses caractéristiques du système réel étudié, pour se concentrer sur les aspects qui

intéressent le modélisateur et qui définissent la problématique du modèle (Coquillard et Hill.,1973).

La modélisation est un outil de recherche qui permet de synthétiser l'information connue et d'en identifier les manques. Dans les sciences expérimentales ou biologiques, on cherche toujours à établir des modèles mathématiques dans le but de récapituler certaines relations entre deux variables x et y . Le modèle le plus simple est celui donné par une fonction $y = f(x)$.

1.2. Utilisation de la modélisation dans le domaine de la biologie

La modélisation, notamment à travers les modèles de culture, biochimique, physiologie...etc donne lieu à une production scientifique importante en science biologique. En agronomie, l'utilisation de la modélisation est ciblée sur la simulation de l'impact des pratiques agricoles ou du choix des systèmes de culture, ainsi que sur le fonctionnement et les performances du système climat-sol-plante.

D'après les statistiques qui portent sur les travaux de recherches (à travers la consultation des publications) qui s'inscrivent dans la discipline de la modélisation, les deux tiers des auteurs n'identifient aucun usage, ni aucun utilisateur de leurs modèles. Il ne peut donc pas exister de lien entre conception et usage dans la majeure partie des recherches effectuées dans le cadre de la modélisation.

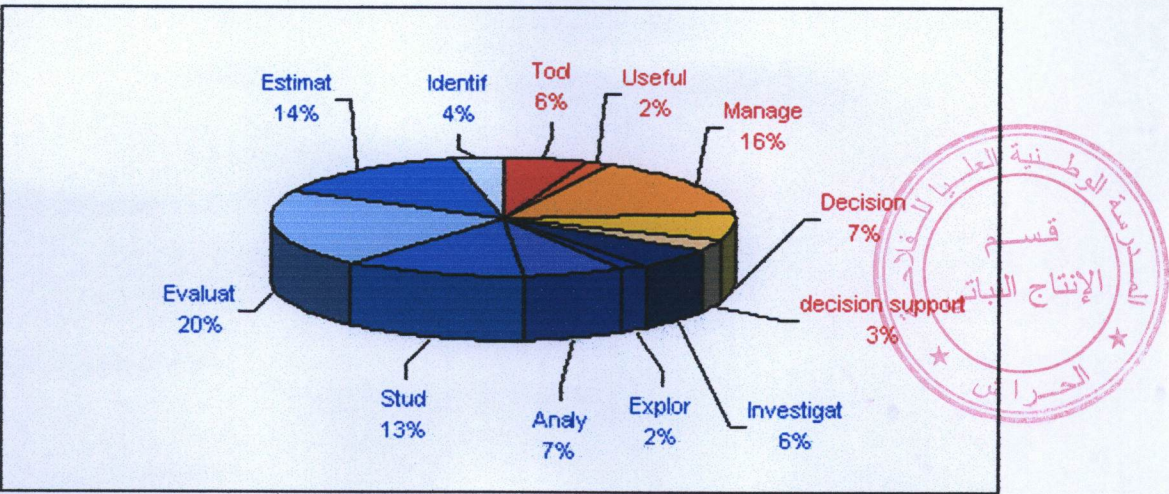


Figure 1 : Identification des objectifs des articles scientifiques par quantification de mots-clés relatifs à l’exploration (en bleu) et a l’utilisation (en rouge).

De même, lorsqu’un usage ou un utilisateur est mentionné, les auteurs se réfèrent autant à une utilisation de recherche qu’à une utilisation en dehors de la recherche. La grande majorité des travaux de modélisation sont considérés comme des outils de la recherche.

Cependant, nous pouvons citer trois catégories de travaux de modélisation qui font mention d’un usage: (1) des modèles a vocation *recherche*; (2) des modèles a vocation *décision publique*; et (3) des modèles a vocation *non recherche*.

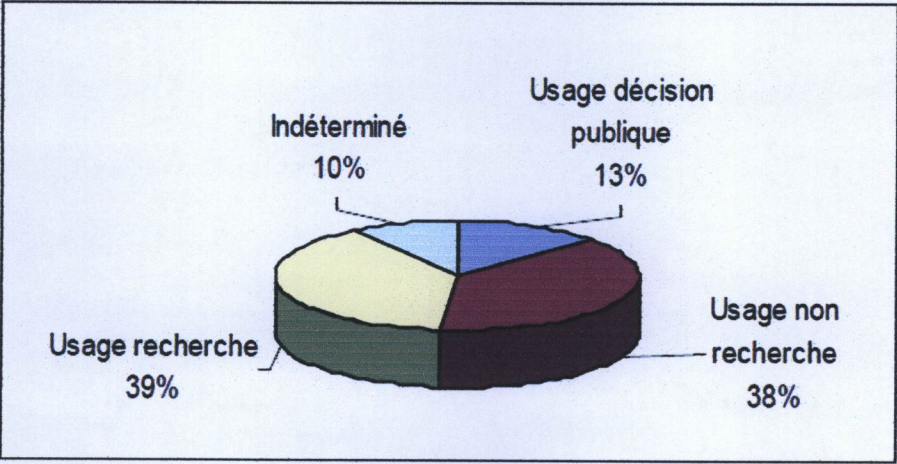


Figure 2 : Catégorisation de l’usage des modèles mentionner dans les travaux de la modélisation.



1.3. Classification des modèles

Selon l'objectif et le domaine de recherche scientifique, les modèles peuvent être classés en fonction de la forme du modèle et la présence (ou l'absence) de la structure mathématique dans la structure de modèle.

1.3.1. Classification en fonction de la forme

a) Modèle conceptuel

Les modèles conceptuels ou verbales sont des modèles basés sur l'utilisation d'un langage naturel pour la description et le diagnostic d'un système et/ou sa dynamique. Par exemple, la description d'un plan expérimental lors de la réalisation d'une expérience en plein champs est considérée comme un modèle conceptuel. Dans ce cas, la planification des facteurs expérimentaux, les niveaux de chaque facteur, ainsi que l'ensemble des témoins constitue les différentes parties de ce modèle.

b) Modèle physique

C'est une représentation physique d'un système étudié, qui projette le fonctionnement réel de l'objet étudié. Les modèles physiques sont caractérisés par leurs structures dimensionnelles définissant les relations entre les différentes parties du modèle (Figure 3). L'ensemble des structures moléculaires biochimiques (ADN, acides aminées, protéine, sucres...etc) sont considérées comme des modèles physiques.

c) Modèle diagrammatique

Le modèle diagrammatique c'est un modèle basé sur des représentations graphiques, schéma (Sketch)....qui illustre des relations et des tendances entre plusieurs objets du système. Il est

réparti en plusieurs modules, chaque module représente une composante du système étudié (Figures 3).

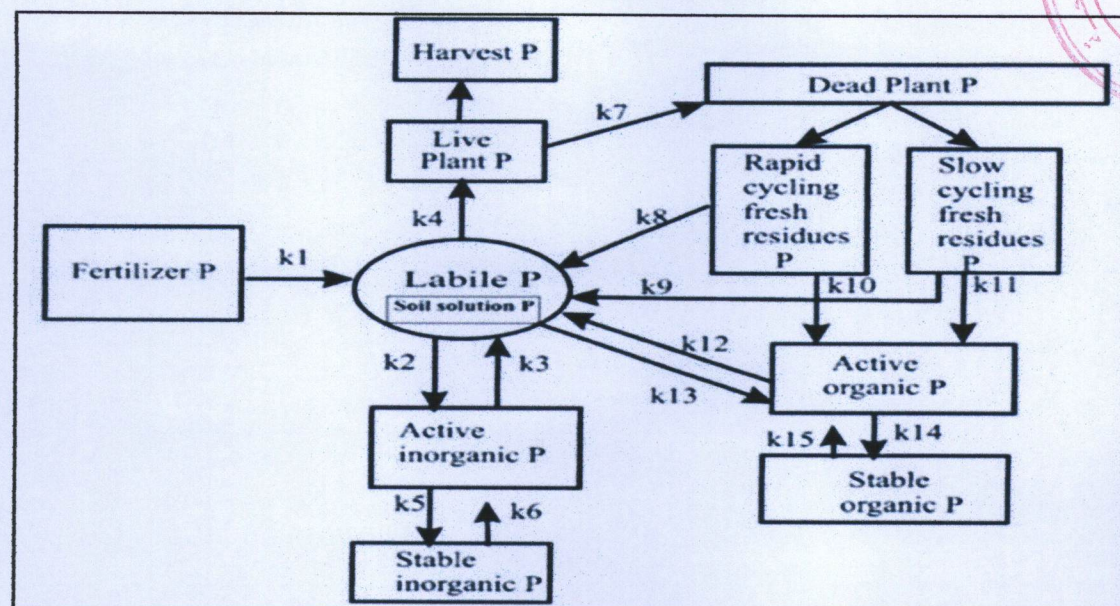


Figure 3: Modèle diagrammatique représente les flux relationnels entre les différents pools du phosphore (P) (K1, K2, K3.....K15 représente les différents flux de transfert de P entre l'ensemble des compartiments du système sol-plante).

d) Modèle mathématique formel

Ce modèle est basé généralement sur l'utilisation des équations algébriques, afin de définir les différents compartiments du système étudié.

Le type des équations utilisées est en fonction de processus et mécanismes qui caractérisent le système étudié.

1.3.2. Classification mathématique

Les équations mathématiques ont un rôle crucial dans la synthèse et la description de la dynamique des systèmes biologiques complexes. Différents modèle mathématique ont donc

été développés afin de décrire l'influence de divers facteurs environnementaux sur le comportement et la dynamique des systèmes biologiques.

La classification mathématique des modèles est basée sur : l'incorporation (ou pas) d'une structure mathématique particulière dans la construction du modèle, à cet effet on distingue 5 classes de modèle:



- a) **Modèle mécaniste:** Dans ce cas, le fonctionnement du système biologique est contrôlé par des processus mécanistes caractérisés par une variation spacio-temporelle (Ex. la croissance de la plante, la photosynthèse, l'évapotranspiration...etc). De plus, ces modèles décrivent les mécanismes physiques, chimiques et biologiques qui déterminent le fonctionnement du système. Ils sont plus complexes que les modèles descriptifs.
- b) **Modèle descriptif:** On parle de modèles descriptifs lorsque les processus du fonctionnement du système biologique sont contrôlés par un paramètre unique (Ex. Variation de la densité d'une population de bactéries dans un milieu contrôlé sous l'effet de température).
- c) **Modèle dynamique et modèle statique:** Le modèle dynamique représente le changement continu du système au cours du temps. Cependant, le modèle statique décrit les variations temporaires qui affectent le fonctionnement du système biologique.
- d) **Modèles continu et modèle discrète:** Quand le temps peut prendre n'importe quel valeur c'est un modèle continu, quand il prend seulement de valeur entiers c'est un modèle discret.

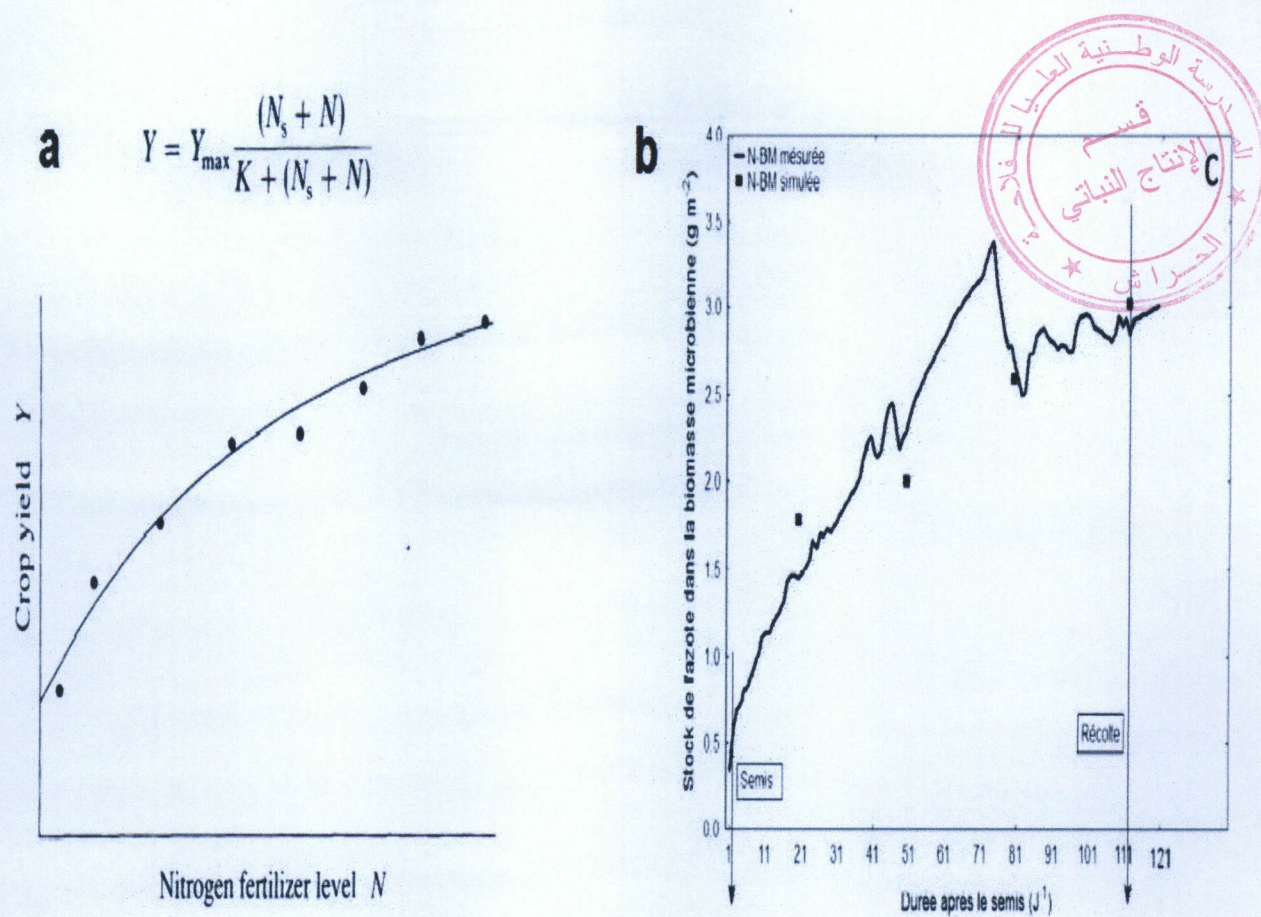


Figure 4: Représentation graphique du modèle statique (**a**: Variation du rendement du blé dur en fonction de la teneur en N dans le sol) et du modèle dynamique (**b**: Variation du stock de N dans la biomasse microbienne dans le sol durant le cycle cultural de le haricot vert).

- e) Modèle hétérogène et modèle homogène:** Quand les objets qui sont simulés ont une position dans l'espace le modèle est spatialement hétérogène, dans le cas contraire il est spatialement homogène.
- f) Modèle stochastique et modèle déterministe:** Quand certain paramètres varient de forme de façon aléatoire le modèle est stochastique et à chaque simulation peut donner des résultats différents. Quand tous les paramètres sont constants le résultat est toujours le même.

Un modèle stochastique est un modèle qui contient une (ou plusieurs) variable aléatoire.

L'équation de base des modèles stochastiques est la suivante:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + \varepsilon$$



Le modèle statique stochastique est adapté à notre objectif si :

1. On cherche une information de type $(Y_1, X_1), (Y_2, X_2)...$
2. On suppose une relation simple entre Y et X
3. On a besoin d'un traitement explicite des erreurs :
 - Pour l'estimation des paramètres
 - Evaluation de la qualité de prédiction

Remarque1:Un problème avec un modèle déterministe est le fait qu'en général la relation n'est qu'approximative. C'est surtout le cas pour des modèles en biologie en général et en agronomie en particulier, où les systèmes sont très complexes et seulement compris que partiellement.

Remarque 2:La partie déterministe explique le plus possible de la variabilité de Y . Cependant, la partie aléatoire (ou stochastique) représente fidèlement l'erreur du modèle déterministe.

La figure 4 représente le schéma simplifié de la classification des modèles. Cette classification est en fonction de l'intégration (*Oui*) ou pas (*Non*) de la structure mathématique dans la description de divers fonctionnements du système biologique.

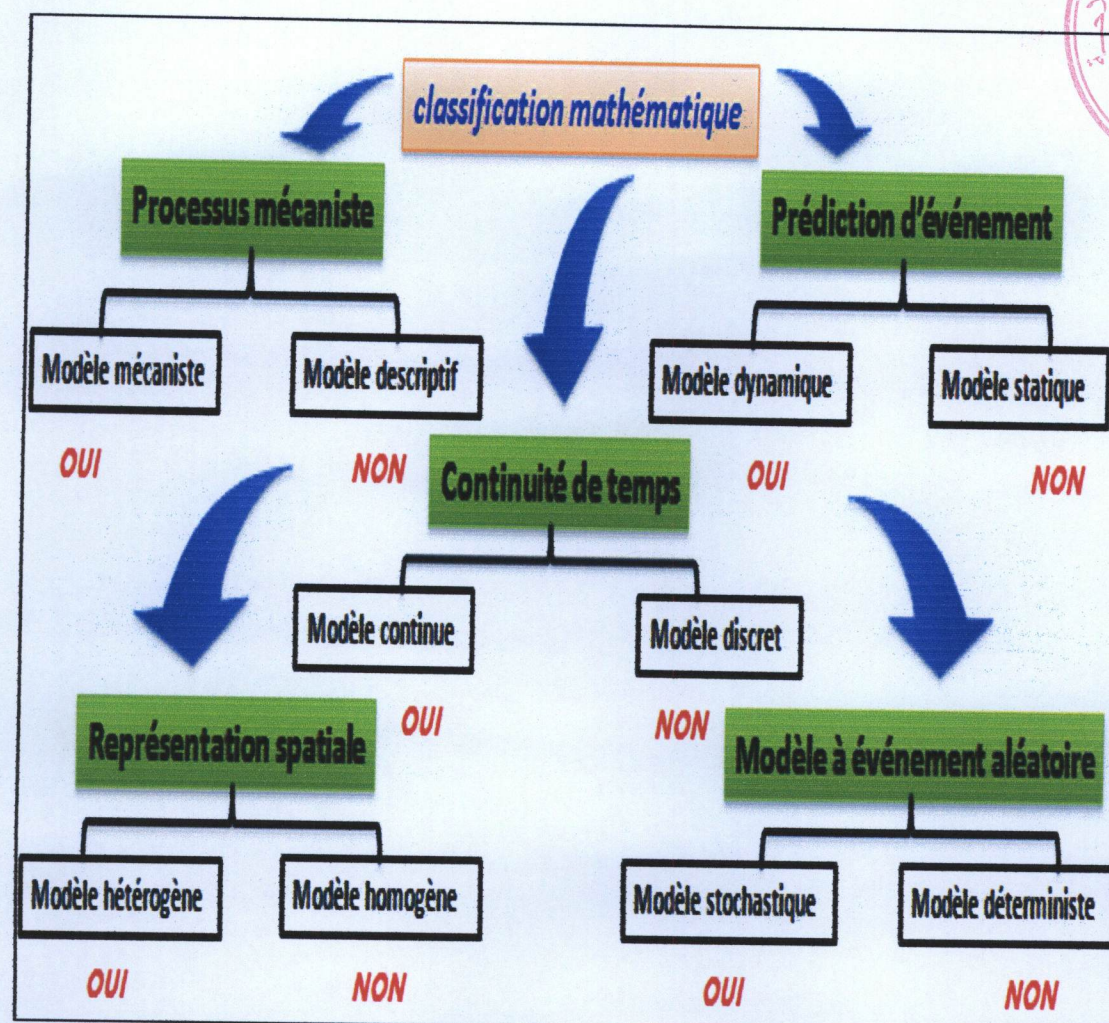


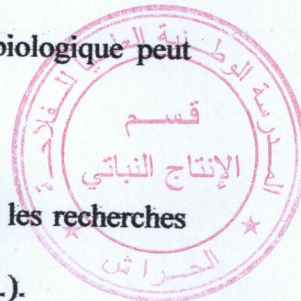
Figure 5: Classification mathématiques des modèles

1.4 .Importance de la modélisation

Les modèles peuvent être employés dans plusieurs domaines scientifiques pour répondre à certaines problématiques, ils nous permettent de *comprendre*, *prédire*, et de *contrôler* le système étudié.

Par conséquent, trois problèmes généraux auxquels les scientifiques font face dans n'importe quelle discipline de la connaissance sont: *Synthèse*, *instrumentation* et *analyse*. De ce fait la

modélisation des transferts entre les différents compartiments du système biologique peut permettre:



- ☐ Utilisation comme un cadre conceptuel pour organiser ou coordonner les recherches empiriques (concevoir des expériences, techniques d'échantillonnages...).
- ☐ Identifier les secteurs de l'ignorance, particulièrement en définissant des relations entre les objets.
- ☐ De récapituler ou synthétiser de grandes quantités de données (Régression linéaire : $y = mx + b \dots$).
- ☐ De Fournir une clarification aux gestionnaires ou aux planificateurs (ou autres) par l'exécution "qu'arrive-t-il si ?" des modèles de simulations.

Conclusion

Les applications de la modélisation en biologie sont très larges, et couvrent des domaines aussi divers, la physiologie, la microbiologie, la bio-géochimie, la biochimie, l'épidémiologie, la carcinogenèse, l'écologie, la modélisation des écosystèmes, les mutations génétiques, la modélisation de l'évolution des espèces.....etc.

Par ailleurs, la modélisation constitue un outil de choix pour étudier la dynamique du système biologique afin de comprendre et analyser son comportement vis-à-vis des changements globaux affectant l'environnement.

En effet, la modélisation des systèmes biologique permet de fournir des informations à la fois qualitatives et quantitatives sur la structure et le fonctionnement du système, informations qu'il aurait été difficile ou impossible d'obtenir par la seule voie expérimentale.



Chapitre 2: Les étapes de la modélisation mécaniste

Introduction

L'incapacité des modèles empiriques à pouvoir caractériser les effets des conditions environnementales sur le comportement du système biologique à nécessiter le développement de modèles mécanistes permettant de décrire correctement la dynamique fonctionnelle de diverses communautés de la biocénose.

L'utilisation d'outils de modélisation mécaniste nécessite une caractérisation fine des différents compartiments du système étudié ainsi qu'une détermination de l'ensemble des paramètres affectant cette dynamique. La conception des modèles mécaniste nécessite la collaboration entre un informaticien, un mathématicien et un biologiste pour la gestion et l'organisation de ces modèles.

2.1. Formulation du modèle

2.1.1. Formulation qualitative: Diagramme de Forrester

Les **diagrammes de Forrester** ont été inventés par Jay Forrester et sont un outil de base pour la formulation qualitative de modèles dynamiques. Ce diagramme ne contient pas des équations mais montrent les objets et les inter relations entre les différents compartiments du système étudié, selon les hypothèses posées. Ils servent comme base pour la formulation quantitative.

Tous les transferts d'énergie et de matière entre les différents compartiments du système doivent être représentés lors de la formulation qualitative.

La réalisation de diagramme qualitatif nécessite l'utilisation du code de Forrester (Voir fig. 6) qui illustre la manière de configuration schématique de toutes les interactions entre l'ensemble des variables (compartiments) du système étudié.

nom a) Variable d'état	b) Flux de matière où énergie	c) Flux d'information (influence)
d) Source où puit	nom e) Paramètre où constant	nom f) Équation de flux
nom g) Variable auxiliaire	nom h) Variable exogène	

Figure 6: Eléments basique de diagramme de FORRESTER

La figure 7 représente un exemple sur la formulation qualitative du modèle mécaniste expliquant les mécanismes des transferts et dégradation du carbone organique dans le système sol-plante-atmosphère (A, D, L et G sont les compartiments du modèle, a, b, c... sont les paramètres du modèle et qui représentent la description des différents transferts entre chaque deux compartiments).

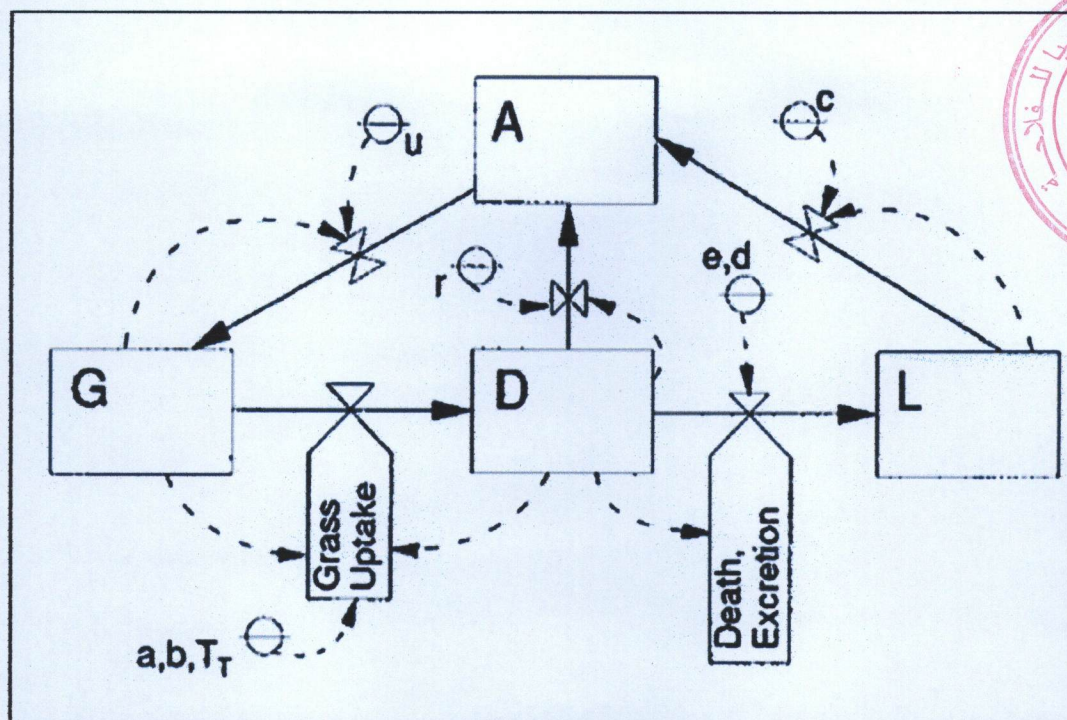


Figure 7: Formulation qualitative des transferts du carbone dans le système sol-plate-atmosphère.

2.1.2. Formulation quantitative

La formulation quantitative du modèle mécaniste consiste à décrire quantitativement à l'aide des équations mathématiques (la plus simple c'est celle de l'équation linéaire: $y = a x + b$) tout flux de transfert entre chaque deux variables du système (variable d'état: compartiment ou une variable auxiliaire: un paramètre ou une constante). Lors de cette formulation quantitative certaines règles doivent être respectées:

1. Chaque variable d'état (ex. compartiment) a besoin d'une équation différentielle.
2. Chaque flux d'entrée et de sortie d'une variable d'état a besoin d'une équation.



3. La somme des flux d'entrée et de sortie définit l'équation différentielle de la variable d'état.

Une généralisation de l'équation différentielle d'une variable d'état est a , b , c et d sont les paramètres du modèle. Cependant x et y sont les compartiments du modèle) (Voir figure 8):

- $dx/dt = \Sigma \text{entrées} - \Sigma \text{sorties}$
- $dx/dt = (a+b) - (c+d)$

Plusieurs séries de mécanismes mathématiques peuvent servir pour la formulation quantitative des modèles. Ces séries constituent la boîte d'outils qui peut être utilisée dans la formulation de nos modèles pour étudier les systèmes biologiques les plus complexes.

$$\frac{dD}{dt} = \left(\frac{aT_T G}{1+abG} \right) D - rD - D(e+d) \quad (5.1)$$

$$\frac{dG}{dt} = uG - \left(\frac{aT_T G}{1+abG} \right) D \quad (5.2)$$

$$\frac{dL}{dt} = D(e+d) - cL \quad (5.3)$$

$$\frac{dA}{dt} = -uG + rD + cL \quad (5.4)$$

a	Deer successful search rate for grass
b	Deer handling time while eating grass
c	Rate of decomposition of feces and dead deer by bacteria
d	Rate of feces production by deer
e	Fraction of deer carbon becoming rotting corpses
r	Rate of deer production of gaseous carbon (respiration)
T_T	Total time for foraging
u	Rate of atmospheric carbon uptake by grass

Figure 8: Formulation quantitative des transferts du carbone dans le système sol-plante-atmosphère.

2.2. Calibration du modèle

La calibration du modèle mécaniste formulé est un processus d'estimation des paramètres d'un modèle.

La détermination de ces paramètres nécessite: (i) le recours à la littérature dont les paramètres ont été déjà défini dans des travaux de recherche ultérieurs; (ii) cependant, les paramètres du modèle peuvent être optimisé quand nous disposons des données réels du comportement des variables d'état au cours du temps. Dans ce dernier cas, les données sont réellement générées à partir d'une expérimentation généralement de type factoriel.

L'optimisation des modèle mécaniste a pour but de chercher le ou les paramètres qui minimisent la distance entre les prédictions du modèle et les données observées sur terrain afin d'améliorer la justesse du modèle. A cet effet, plusieurs méthode mathématiques et statistiques sont utilisé pour minimiser l'erreur qui représente la différence entre les données simulées par le modèle calibré et celles observées par l'expérimentateur (Voir Fig. 9).

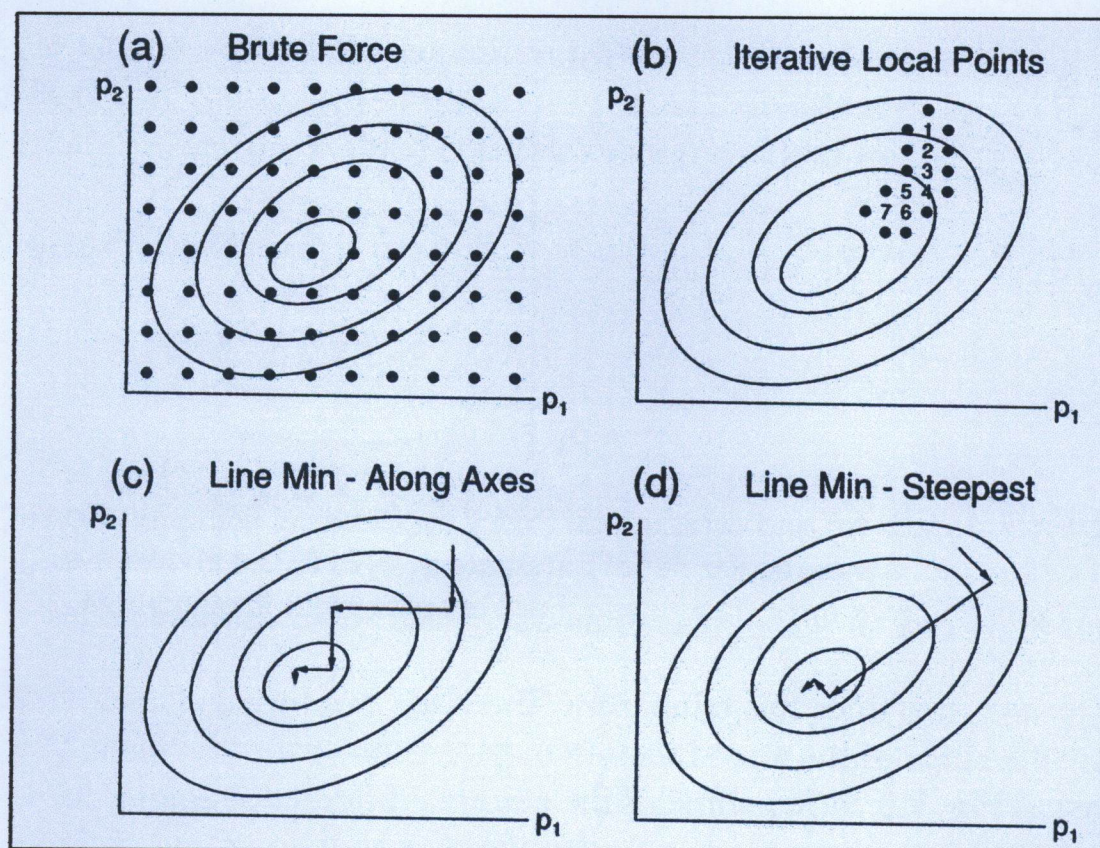


Figure 9: Méthodes employées pour la détermination du minimum d'une fonction d'erreur

2.3. Validation du modèle

La validation des modèles mécanistes est un processus pour tester les modèles par rapport à la validité de ses hypothèses, degré de simplification et exactitude des paramètres à travers la confrontation avec des données réelles. La principale différence entre calibration et validation est que la validation n'est pas faite pour calculer les paramètres mais pour tester le modèle.

De plus la validation du modèle se fait généralement dans diverses conditions environnementales (Ex. des essais de culture multi-locaux, observations de certaines variables physiologiques chez une espèce données dans divers milieux écologiques (Voir chapitre 3)).

Cependant, la calibration du modèle vise à optimiser les paramètres du modèle sous des conditions expérimentales relativement contrôlées ; généralement ce sont des essais factoriels (Voir chapitre 3).

Facteurs à prendre en compte pour la validation

1. **Indépendance des données:** Les données doivent être indépendantes de celles utilisées pour construire ou calibrer le modèle.
2. **Nombre de réponses du système:** Variables d'état qui vont être utilisées pour la validation (une ou plusieurs).
3. **Nombre de points au cours du temps:** Un ou plusieurs points au cours du temps.
4. **Degré de réplification:** Les tests statistiques ont besoin d'un certain degré de variabilité. Cette variabilité peut se trouver dans les données réelles ou dans les prédictions du modèle.



Dans la réalité la variabilité viens de la réplification. Dans les modèles la variabilité se produit seulement quand il y a un facteur stochastique.

Quelques méthodes statistiques

En fonction de la nature et le type des données utilisées lors de la validation des modèles, il est nécessaire de passer par certains tests statistiques afin de confirmer la fiabilité de ces données pour la validation du modèle construit.

Les différents tests statistiques employés dans cette phase de pré-validation sont représentés dans le schéma représenté par la figure 10.

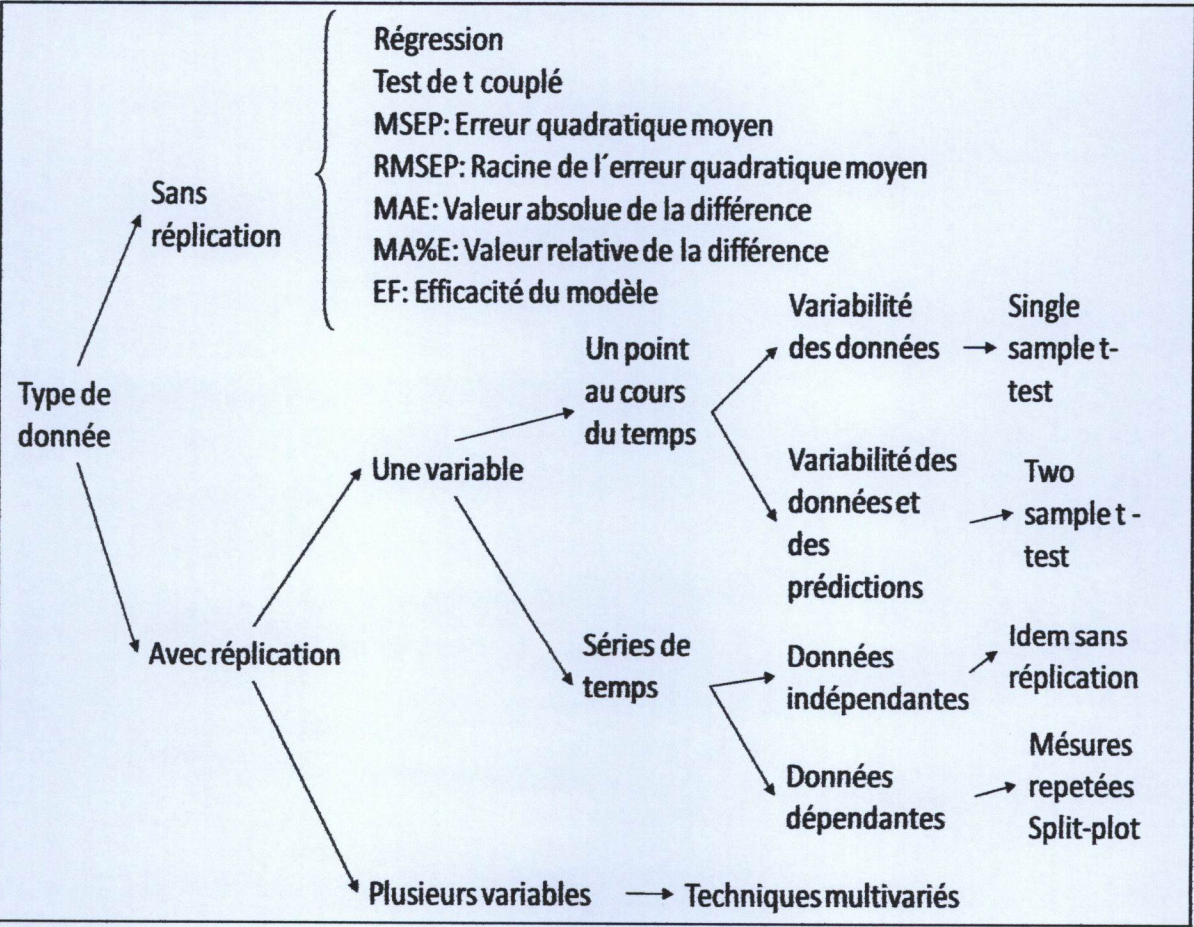


Figure 10: Quelques méthodes statistiques employées dans la pré-validation des modèles
mécanistes

2.4. Analyse du comportement et sélection du meilleur modèle

Cette étape de modélisation consiste à analyser les différences dans la réponse du modèle à des petites variations dans les valeurs des paramètres. Il est possible de varier un seul paramètre à la fois ou carrément de varier plusieurs paramètres.

Ces variations doivent être différentes par rapport aux conditions dans lesquelles le modèle a été calibré et validé durant la première fois. L'analyse du comportement du modèle a pour but de:

- ❖ *Évaluation du modèle*
- ❖ *Planification de la recherche*
- ❖ *Contrôle du système*

✚ *Analyse du comportement et analyse discriminante du modèle*

L'analyse de la stabilité du modèle mécaniste consiste à étudier la réponse du modèle à des petites perturbations des variables d'état (Compartiment du modèle).

Le système est dit stable quand il retourne au point précédent (état initial) après une perturbation.

Par ailleurs, l'analyse discriminante est un outil pour tester la qualité de simulation des modèles mécaniste.

Lorsque nous avons différents modèles qui représentent des hypothèses alternatives sur le fonctionnement du système nous pouvons choisir le meilleur par confrontation avec les données. Le critère est de choisir le modèle qui décrit au mieux le fonctionnement du système avec le moins de paramètres (Fig. 11).

Le calcul de Racine de l'erreur quadratique moyen (RMSEP) est un moyen très puissant pour prendre une décision lors de l'analyse discriminante du modèle, le RMSEP est donné par la formule suivante (x et y sont les variables d'état du système étudié, alors que n représente le nombre des répétitions des mesures effectuées):

$$RMSEP = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - y_i)^2}$$

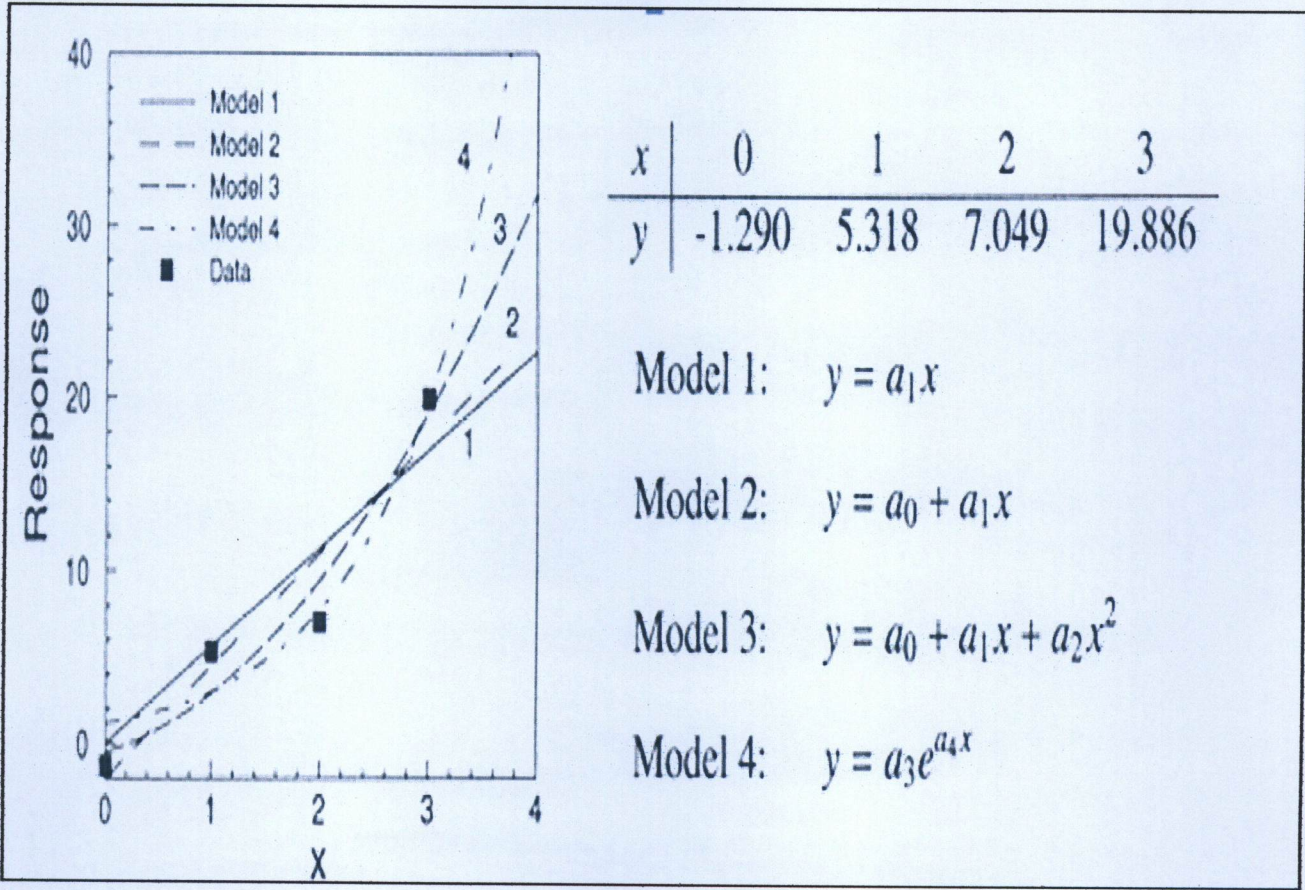


Figure 11: Comparaison entre la qualité de simulation de 4 modèle par le calcul de RMSEP

2.5. Couplage des modèles mécanistes

Le couplage des modèles a révélé des différences d'approche de modélisation et des points d'intérêt non systématiquement convergents.

Exemple : Couplage de modèle **M1** et **M2**:

M1: modèle agronomique basé sur le calcul des efficacités d'utilisation de la lumière, de l'eau et de l'azote et calcule en kg ha⁻¹ la biomasse sèche puis définit les contenus de carbone et d'azote. **M2**: est un modèle écologique qui décrit les cycles du carbone et de l'azote et calcule tous les stocks en g m⁻² et les flux en g m⁻² d⁻¹.

Le couplage entre les modèles d'eau, du sol et de production végétale, permet de comprendre et prévoir plusieurs mécanismes qui se déroulent entre ces trois systèmes biologiques. De plus, ce couplage est considéré comme un outil prévisionnel essentiel de la durabilité des écosystèmes.

A titre d'exemple, MOMOS (Matière Organique et Microorganisme du Sol) est un modèle mécaniste qui simule la production et la décomposition de la MO dans sol (Voir chapitre 3), ce modèle était couplé avec deux modèles (SAHEL et FARPROM) afin de prédire tous les transferts de carbone et de l'azote entre les différents compartiments du système sol-plante-atmosphère (Figure 12).

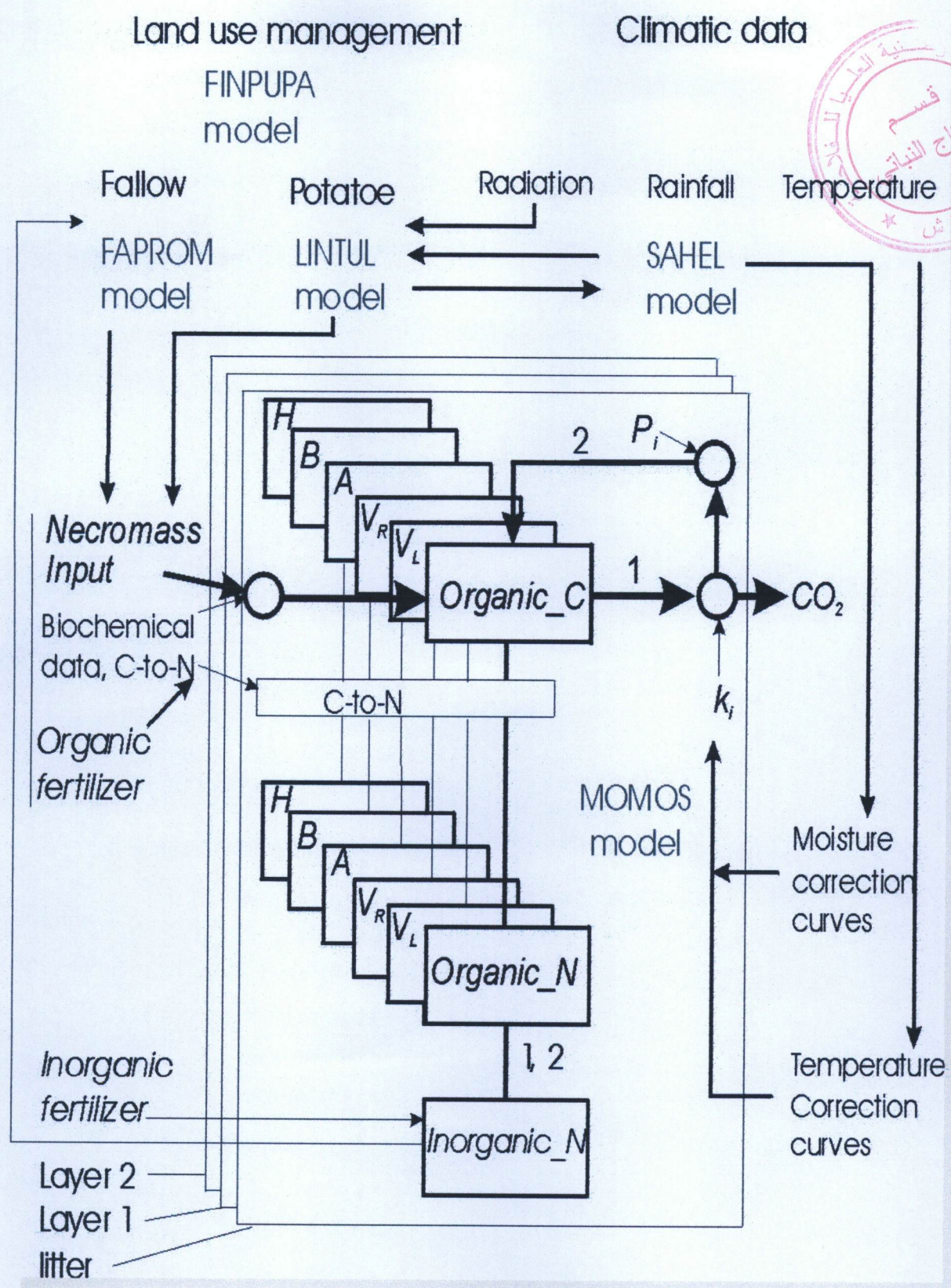


Figure 12: Couplage des différents compartiments de modèle MOMOS

Conclusion

Il est nécessaire de passer par cinq phases successives lors de la conception du modèle mécaniste: En premier lieu le modèle doit être formulé quantitativement et qualitativement.

Cette formulation est directement suivi par une calibration qui consiste à optimiser l'ensemble des paramètres constituant le modèle. Cependant, la phase de validation représente la première phase de fonctionnement du modèle dans des conditions réelles, cette dernière phase doit être suivie par une phase qui consiste à vérifier la sensibilité et le comportement de simulation du modèle. Enfin la phase finale a pour but de coupler le modèle conçu avec autres modèle afin de le rendre compatible avec d'autres conditions de l'environnement (Voir Figure13).



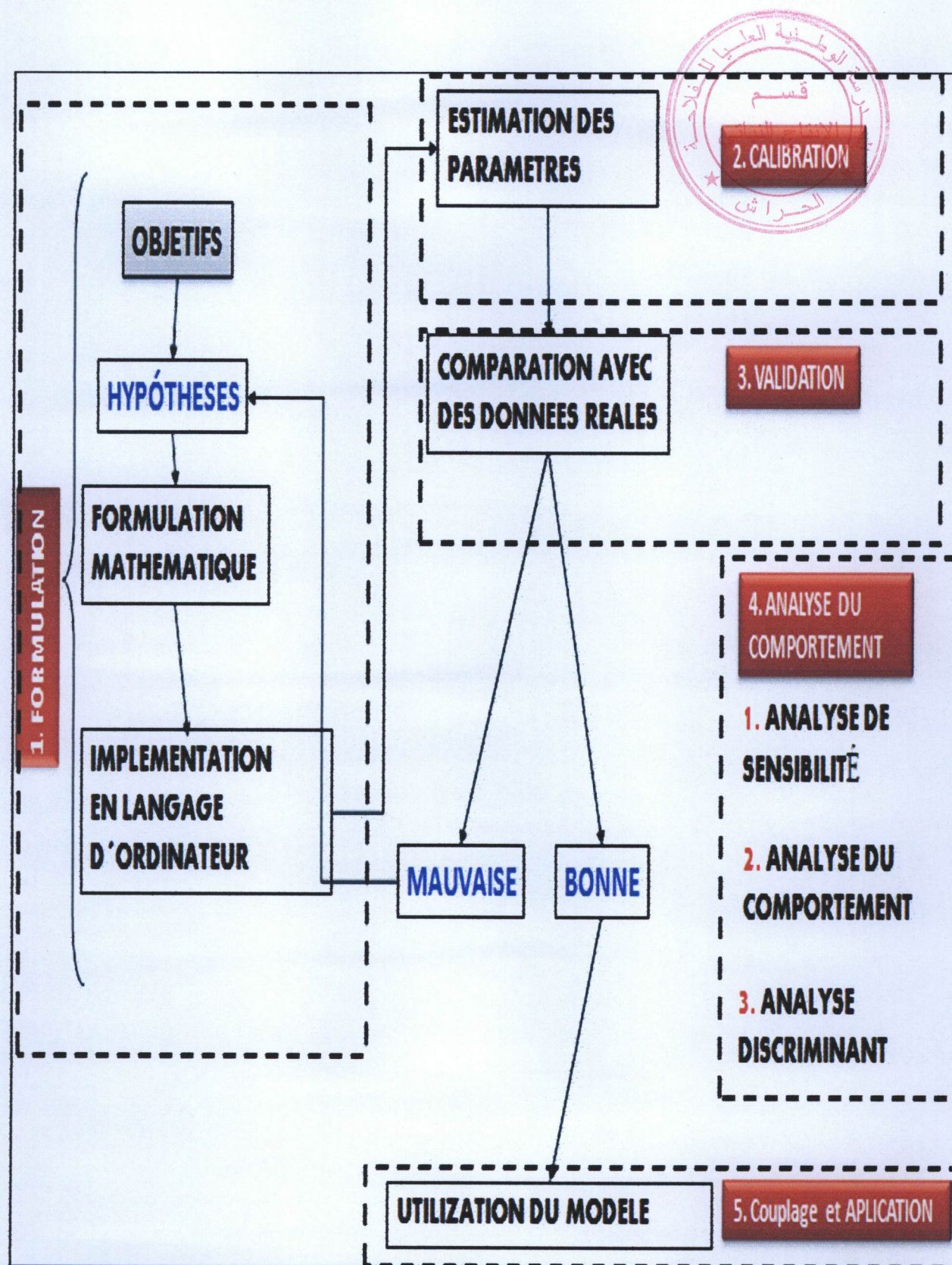


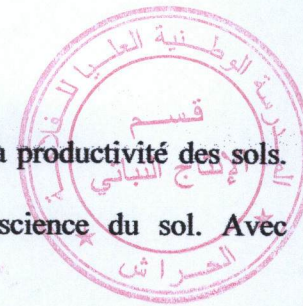
Figure 13: Schéma récapitulatif des différentes phases de modélisation mécaniste



Chapitre 3:Modélisation des cycles de carbone et de l'azote
dans le système de production végétale

Introduction

La dynamique du C et de N influence potentiellement la qualité et la productivité des sols. Elle a été depuis longtemps un des objectifs importants de la science du sol. Avec l'amélioration de la méthodologie expérimentale,



Les scientifiques ont accumulé de précieux renseignements sur la dynamique du C et de N dans le sol et ils ont amélioré la gestion agronomique des intrants. D'après la littérature, les modèles conceptuels qui concernent les cycles du C et N dans les sols sont toujours en développement.

Cependant, parmi les plus grandes révolutions dans l'étude des cycles C et N dans les 30 dernières années apparut le développement des modèles de simulations mécanistes, et la liaison des processus avec l'écosystème. Ceci a été rendu possible par l'introduction de l'outil informatique avec des capacités de calcul et de mémoire suffisantes pour permettre la simulation des systèmes complets et intégrés entre les compartiments sols-plante-atmosphère.

3.1. Généralité sur le cycle du carbone

Le cycle du C est un processus dynamique fermé dans lequel le C est transféré par des forces identifiables entre des réservoirs distincts selon des flux mesurables, le bilan global des échanges entre les réservoirs étant nul. L'élément C représente environ 0,8% de l'écorce terrestre.

Il se présente naturellement sous deux formes, cristalline (pure) et moléculaire. La forme cristalline, le graphite et le diamant, existe en quantité infinitésimale au regard de la forme moléculaire.

Le C se retrouve dans l'ensemble de notre environnement dans l'atmosphère, sur terre, sous terre et dans les océans, sous forme minérale ou organique (vivante et morte).

On distingue ainsi les grands réservoirs de C: l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère, la lithosphère. La biosphère terrestre est formée par la végétation et l'épaisseur de sol impliquée dans le cycle global du C.

3.2. Généralité sur le cycle de l'azote

L'azote se mobilise selon un cycle biogéochimique au cours duquel il se transforme de la forme organique à la forme minérale. La plupart des transformations d'azote impliquent l'oxydation et/ou la réduction de l'atome d'azote par des processus biologiques et physicochimiques. Dans l'atmosphère, l'azote existe principalement sous la forme moléculaire (N_2) qui correspond à 78% des gaz atmosphériques.

La transformation de N_2 en d'autres formes nécessite de l'énergie pour briser la liaison $N=N$ (Jego, 2008). Malgré sa disponibilité dans la nature, les plantes n'ont pas la capacité de l'assimiler directement. Les plantes absorbent l'azote dans le sol sous forme de nitrates (NO_3^-) et d'ammonium (NH_4^+), l'importance relative de chacune de ces formes dépendant de l'espèce végétale et des conditions du milieu.

3.3. Modèles de décomposition

La MOS joue un rôle fondamental dans le maintien de la fertilité *via* ses effets sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. L'importance des pools de MOS dépend des apports de la MO (grâce aux résidus après récolte, au turnover des racines et des mycorhizes et aux exsudats racinaires), et des pertes de C, principalement via la respiration hétérotrophe due à la décomposition de la MOS. A cet effet, de nombreux modèles compartimentaux de décomposition des matières organiques ont été élaborés, parmi lesquels on peut classer :



3.3.1. *Modèle linéaire*

Les flux de sortie d'un compartiment sont liés uniquement au contenu de ce compartiment selon une cinétique d'ordre 1. Dans la littérature le plus grand nombre de modèles de décomposition sont de ce type, on peut citer parmi les plus connus Century. Cependant, le flux de respiration est affecté par ces limitations, par contre celui de la minéralisation nette d'azote ne l'est pas en général. Le traitement de ces deux flux est particulier et varie d'un modèle à l'autre. La respiration est proportionnelle à la biomasse microbienne mais les modèles considèrent une perte lors de chaque flux de décomposition, par contre la minéralisation est liée au rapport C/N.

3.3.2. *Modèle non linéaire*

La sortie de chaque compartiment est proportionnelle à la fois à son contenu et à la croissance des décomposeurs ou de leurs enzymes. Les microorganismes produisent des enzymes extracellulaires qui dégradent la MO. Les microorganismes absorbent le carbone dissous par les enzymes, de ce fait il y a une voie indirecte entre les biomasses microbiennes et la MO du sol. Enfin, la conception de ces modèles de décomposition de matières varie en fonction des objectifs de chaque modèle. Dans les dernières décennies, différents modèles mathématiques avec des niveaux de complexité distincts sont développés pour décrire des processus biogéochimiques dans le sol.

3.4. Le modèle MOMOS

MOMOS (Micro-Organismes et Matière Organique du Sol) est un modèle de décomposition qui explique l'écologie fonctionnelle de la biomasse microbienne. Il a été conçu de manière à limiter les paramètres principalement à des taux de transferts entre les compartiments qui ont été ajustés grâce à des expériences d'incubation avec traçage isotopique.

3.4.1. Structure et formulation du modèle MOMOS

3.4.1.1. Formulation qualitative

Le modèle MOMOS est proche des modèles linéaires dans sa structure. Cependant seule l'expression de la respiration microbienne est non-linéaire : elle est en fonction du pool de la biomasse microbienne au carré ce qui rend le fonctionnement du modèle centré sur le pool de la biomasse microbienne. Cette particularité rend le flux de respiration très sensible aux apports et aux conditions climatiques pour un niveau de biomasse microbienne relativement constant.

MOMOS est constitué de deux pools de MO fraîche (NC labile et NC stable), de deux pools d'humus (labile et stable). Un pool de biomasse microbienne qui contrôle la plupart des flux de et vers ces pools. Le modèle TAO est utilisé pour séparer les résidus végétaux entrants en deux fraction labile et stable. Par ailleurs, le modèle MOMOS est couplé avec le modèle SAHEL qui permet de déterminer l'humidité journalière du sol (Voir Fig.14).



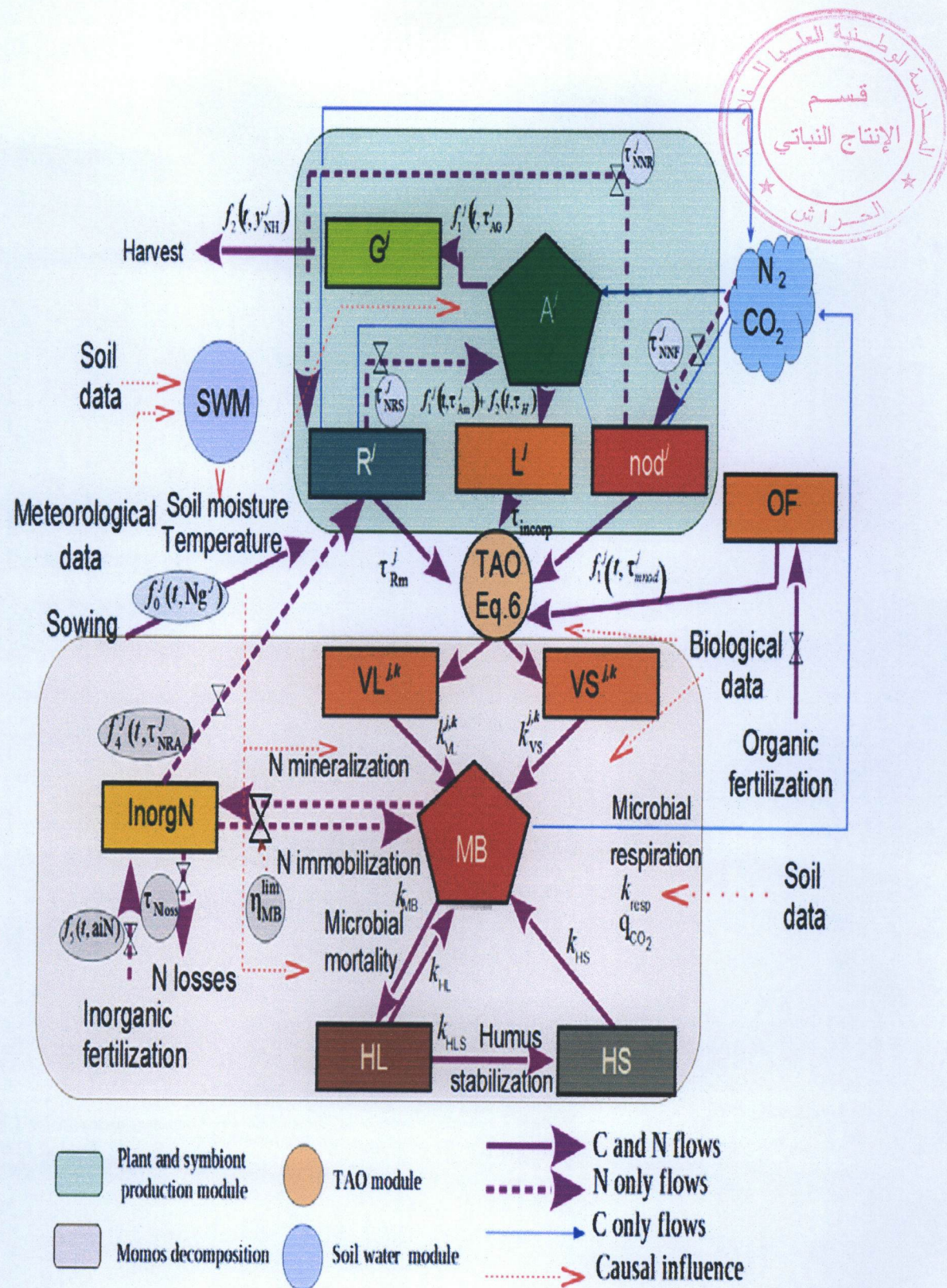


Figure 14: Diagramme relationnel de la Modélisation des Transformations Organiques par les Microorganismes du Sol: MOMOS

3.4.1.2. Formulation mathématique de MOMOS



Tous les paramètres du modèle MOMOS sont connectés à l'humidité du sol (θ) et la température (T) dont il est probablement l'un des modèles les plus sensibles aux changements climatiques, l'équation générale de MOMOS est:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(T) f(\theta) \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \dots\dots\dots 1$$

$\mathbf{x}$ est le vecteur de la variable qui représente la concentration de C et N dans les cinq compartiments du modèle (Biomasse aérienne et racinaire, biomasse microbienne, nécromasse, humus stable et l'humus labile), $\mathbf{A}$ est la matrice des paramètres de modèle. $\mathbf{B}$ est le vecteur qui représente les entrées du C et N d'origine des plantes en culture. $f(T)$ est la fonction de la température et qui est donnée par l'équation 2.

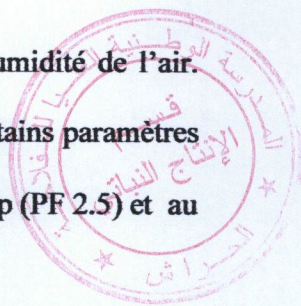
$$f(T) = \text{MIN}\left(\frac{T - T_{\text{opt}}}{Q_{10}}, 1\right) \dots\dots\dots 2$$

T est la température du sol à une couche de profondeur de 0-30 cm et qui est simulée à partir de la température de l'aire, T_{opt} est la température de décomposition optimale de la MO fixée à 28°C, (Thuriès *et al.*, 2001), Q_{10} est la fonction $f(T)$ pour une augmentation de T de 10°C, il est fixé à 2.2 lors de la validation du modèle MOMOS par Pansu *et al.* (2010), $f(\theta)$ est la fonction de l'évolution de l'humidité journalière du sol, elle est définie par l'équation 3.

$$f(\theta) = \text{MIN}\left(\frac{\theta}{WHC}, 1\right) \dots\dots\dots 3$$

L'humidité du sol est simulée à partir du modèle SAHEL (Penning de Vries *et al.*, 1989), en utilisant des données météorologiques recueillies. Les données incluses sont la température

de l'air, les précipitations, le rayonnement solaire, la vitesse du vent et l'humidité de l'air. Mais, afin de valider le modèle SAHEL sur le climat d'une zone d'étude, certains paramètres physiques du sol, à savoir: le point de flétrissement (PF) à la capacité au champ (PF 2.5) et au point de flétrissement temporaire (PF 4.5).



La matrice A du vecteur x (Eq. 1) est représentée ci-dessous:

$$A = \begin{bmatrix} -k_{VL} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_{VS} & 0 & 0 & 0 \\ k_{VL} & k_{VS} & -(k_{VL} + k_{VS}) & k_{HL} & k_{HS} \\ 0 & 0 & k_{MB} & -(k_{HL} + k_{HS}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{HLS} & -k_{HS} \end{bmatrix}$$

Avec x:

$$x = \begin{bmatrix} x_{VL} \\ x_{VS} \\ x_{MB} \\ x_{HL} \\ x_{HS} \end{bmatrix}$$

La teneur en C de chaque compartiment du modèle ($\dot{c}$) de chaque jour du cycle cultural est donnée par la formule suivante:

$$\dot{c} = \sum_{i=1}^5 \dot{x}_i = -q_{CO_2} x_{MB} \dots\dots\dots 5$$

Où le q_{CO_2} représente le quotient métabolique de la biomasse microbienne et qui est donné par l'équation 6:

$$q_{CO_2} = k_{resp} \frac{x_{MB}}{C_{MB}^0} \dots\dots\dots 6$$

Le C_{MB}^0 est une estimation initiale de la biomasse microbienne. Cependant, le k_{resp} est le coefficient de respiration ajusté sur une fraction du sol, avec une texture de 0-20 μm (F_{0-20}). Ce dernier paramètre est ajusté par Pansu *et al.* (2010) lors de la validation du modèle MOMOS sur six sites expérimentaux dans l'agro-écosystème des Andes.

3.4.2. Calibration et validation du modèle MOMOS

Les précédentes études sur la validation du modèle MOMOS (Pansu *et al.*, 2008, 2010) avec l'utilisation des marqueurs isotopiques (^{14}C et ^{15}N) ont permis seulement la quantification de la matrice A représentée dans l'Eq. 1.

Cependant, la valeur du vecteur B et qui représente l'évolution des entrées en C et N d'origine de la dégradation de la nécromasse est totalement ignorée ($B=0$) au cours des dernières utilisations du modèle MOMOS.

Par ailleurs, dans nos récentes études, l'évolution journalière des différentes entrées de la MO (CN nécromasse) est estimée durant le cycle végétatif, au niveau des quatre compartiments de deux espèces en association (CN dans la racine et la partie aérienne du maïs et du haricot) ainsi que la biomasse nodulaire (CN nodules). A cet effet, l'Eq. 1 est devenue:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(T)f(\theta) \mathbf{A} \mathbf{x} + \sum_{j=1}^5 \mathbf{B}j \dots\dots\dots 7$$

L'estimation du vecteur **Bj** nécessite:

- L'estimation quantitative de chaque entrée en nécromasse pour chaque organe chez les deux espèces (céréale et légumineuse);

- L'estimation quantitative de chaque entrée en nécromasse de la fraction labile et stable de l'humus lors de la décomposition de la MO.

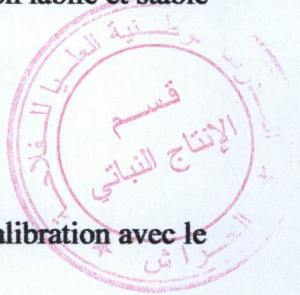


Tableau 1: Paramètres du modèle MOMOS et leurs liaisons proposées à la calibration avec le climat, la qualité des apports et la texture des sols.

Paramètre MOMOS jour-1	Définition du paramètre	Valeurs et relations proposées	Définition des relations
kVL	Taux d'assimilation de VL par BM	$f(T)f(\Theta) \text{ MAX}(0,65-0,0019\Box NC, 0,1)$ Θ : humidité du sol	Climat ($f(T)f(q)$) et rapport C:N de la nécromasse (ηNC)
kVS	Taux d'assimilation de VS par BM	$f(T)f(\Theta) \text{ MAX}(0,0037-0,000026, NC, 0,00005)$	Climat et rapport C:N de la nécromasse
kMB	Taux de mortalité de BM	$f(T)f(\Theta) \text{ MIN}(0,42 -0,0012\Box NC, 0,8)$	Climat et rapport C:N de la nécromasse
kHL	Taux d'assimilation de HL par BM	$0,05 f(T)f(\Theta)$	Climat
kHS	Taux d'assimilation de HS par BM	$0,00005 f(T)f(\Theta)$	Climat
Kresp	Taux de respiration de BM	$f(T)f(\Theta) \text{ MAX}(0,127-0,0021F, 0,01)$	Climat et fraction 0-20 μm du sol (F)
kHLS	Taux de maturation de l'humus	$0,0003 f(T)f(\Theta)$	Climat

Remarque: La validation dans les conditions méditerranéennes est réalisée récemment par Ibrahim et al. (2013) et Latati (2015) sous le système de culture d'association blé dur-féverole en France (Agrosystème de Mauguio) et maïs-haricot en Algérie (Agrosystème de Sétif), respectivement.

3.4.3. MOMOS est un modèle centré sur la biomasse microbienne

Le modèle définit la croissance microbienne par assimilation des compartiments labiles et stables des résidus végétaux et de l'humus ainsi que des exsudats racinaires.

Le modèle couplé visera à prédire simultanément les flux du C et de N de l'atmosphère, respectivement par les stomates des plantes et les rhizobiums, et leur translocation vers les tiges et les racines, les flux de C et N restitués par les plantes aux microorganismes du sol, le flux de C vers l'atmosphère par la respiration microbienne, les flux de N entre les microorganismes et la phase minérale (minéralisation et immobilisation microbienne).

De plus, l'absorption de l'azote minéral par les racines et sa translocation vers les parties aériennes pour chaque plante.

Il intégrera les entrées N par restitution et fertilisation ainsi que les pertes éventuelles par les agrosystèmes vers l'atmosphère et les eaux souterraines.

3.4.4. Application du modèle MOMOS dans le système légumineuse-céréales

Le modèle MOMOS est utilisé pour clarifier la dynamique de N et C au niveau de l'agro-écosystème céréales-légumineuses, sa validation a pour but de répondre à plusieurs questions de recherche sur le système légumineuses-céréales, à savoir:

- Les légumineuses et les céréales en monoculture ou en association, sont-ils des sources ou des puits de carbone ?
- Les légumineuses fixatrices peuvent-elles constituer des sources suffisantes d'azote pour les céréales en association ou rotation? Dans quelle mesure le phosphore limite-t-il la fixation d'azote ?

- A quelle échelle de temps, les sources de N et C sont-elles disponibles ? comment assurent-elles la fertilité et la durabilité des systèmes ?



Conclusion

Il est maintenant prouvé que la justesse du modèle MOMOS est parfaitement adapté dans l'étude de la dynamique de l'azote et du carbone dans les sols méditerranéens notamment les sols algériens qui sont relativement pauvres en MO. MOMOS a permis de prédire la restauration de la fertilité du sol en matière de C et N pour plusieurs systèmes de culture émergeant, il est aussi un outil prévisionnel puissant de premier plan de la durabilité des systèmes de culture agricoles.

3.6.Modèle STICS

Le TICS (Simulateur multidisciplinaire pour les Cultures Standard) est un modèle de culture mécaniste à pas de temps journaliers il a été développé sur plusieurs type de cultures annuelles et pluriannuelles. Ce modèle est dédié pour simuler l'ensemble des variables agronomiques qui sont affectées par le système complexe sol-plante-atmosphère. Le STICS est un dynamique potentiellement sensible aux variations climatiques, sa validation et sa calibration ont été testé à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation agricole.

3.6.1. Historique et évolution du modèle STICS

La conception du modèle STICS a connu une évolution rapide et très dynamique. A cet effet le modèle est passé par plusieurs périodes de formulation (quantitative et qualitative) sur l'axe de temps qui s'étale de 1996 a 2012. Cependant, de nouvelles versions sont récemment (à

partir 2018) développées, plus particulièrement pour les systèmes de culture en association (e.g. légumineuse-céréales) et en cultures intercalaires (e.g. culture céréalière et légumineuse en intercalaire avec des arbres fruitiers)

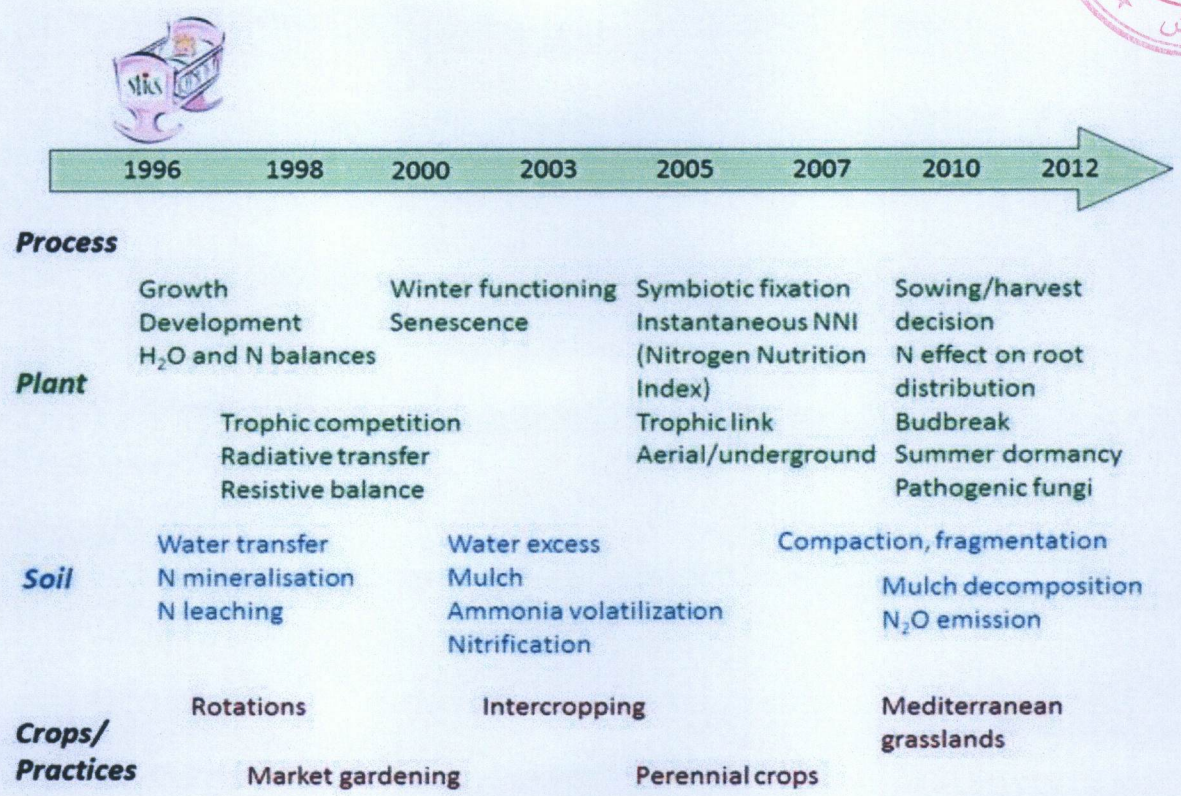


Figure 15 : Evolution des différentes versions du modèle STICS entre la période qui s'étale de 1996 a 2012

3.6.2. Paramètres et domaine de validation

a/ Entrées : Le STICS est un modèle très mécaniste et très dynamique dans le système complexe atmosphère-sol-plante. De plus, STICS est un modèle très robuste pour la gestion des pratiques culturales. A cet effet, l'ensemble des paramètres d'entrée de ce modèle sont : paramètres du Sol, Climat, Plante et Pratiques culturales. L'ensemble des composantes qui constituent les différents paramètres d'entrée du modèle STICS sont appelées « Unité de simulation » ou bien USM.

b/ Sorties : STICS simule une gamme très large d'indicateur agro-environnementaux, qui sont très utiles pour l'étude de la durabilité des agroécosystèmes. STICS simule les variables Agronomiques (Rendement, Biomasses...) et Environnementales (Lessivage des nitrates). D'après les dernières versions du modèle STICS, ce dernier simule de 600 variables agro-environnementales.

c/ Principaux Processus Simulés : En terme de phénomènes et processus agro-éco-physiologiques, STICS simule la Croissance des plantes, l'ensemble des stades de développement des cultures, le bilan hydrique et d'azote dans tout le système de culture.

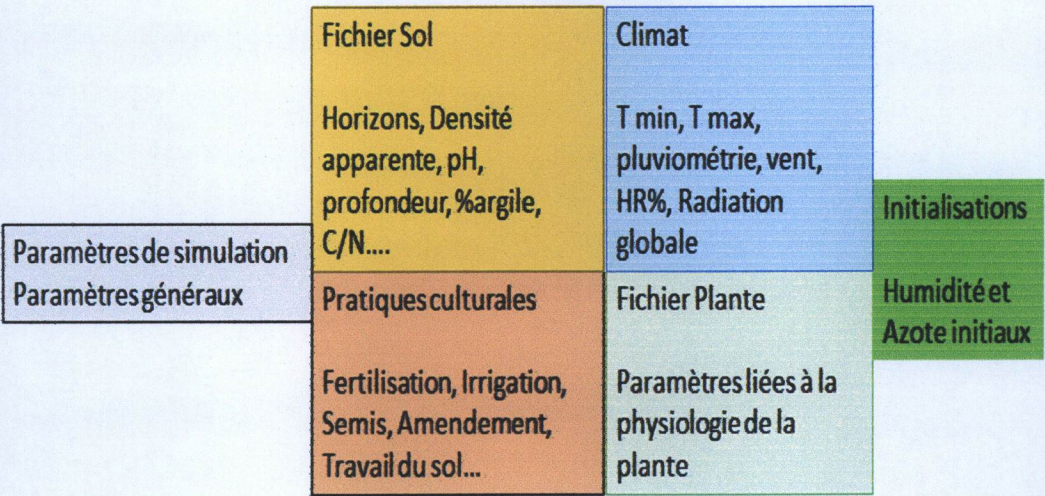


Figure 16 : Les différentes composantes qui constituent l'unité de simulation du modèle STICS (USM)

3.6.3. Points de force et de robustesse du modèle STICS

Le modèle STICS est un modèle très adapté sur plusieurs espèces, ce qui le classe comme étant un modèle qualifié en termes de « **Généricité des cultures** ». Il est calibré sur large gammes de cultures (blé, tomate, banane, sorgho, carotte, laitue, vigne, fève, soja.....). De

plus, la **modularité** du modèle STICS est très vaste et complexe, il permettra une validation sur plusieurs systèmes de culture complexes et sur des processus physiologiques et écologiques très diverses et complexe (e.g. système de culture en association, intercalaire, lixiviation des nitrates, volatilisation de l’ammonium, fixation symbiotique de l’azote.....etc).

Tableau 2 : Exemple de formalisme du modèle STICS pour l’espèce blé dur

Développement	Température pilote	température air		température culture
		horaire	journalière	
	Plante photopériodique	non		oui
	Effet retard stress	non		oui
	Besoins en froid	non	vernalisation	dormance
	Début de végétation	annuelle		pérenne
		germination	pas de germ.	
		hypocotyle	plantation	
	Gel plantule ou levée	non		oui
Croissance en biomasse totale	Interception rayonnement	loi de beer		transfert radiatif
	Seuils de température	idem.LAI		différents LAI
Croissance foliaire en surface	Fonction foliaire	LAI		Taux de recouvrement
		LAI net	LAI brut - sénesc.	
	Gel phase juvénile	non		oui
	Gel phase adulte	non		oui
Elaboration rendement/Qualité	Type de croissance	déterminée		indéterminée
		IR en jours	IR en °C.jours	nb infloresc. imposé
	Contrainte thermique	non		oui
	Gel fleurs/fruits	non		oui
Répartition	Type de plante	monocotylédone		dicotylédone
Croissance racinaire	Température pilote	température sol		température culture
	Densité racinaire	profil optimal type		densité vraie
Bilan hydrique	Besoins en eau	coefficient cultural		modèle résistif
	Interception de la pluie	non		oui
Bilan azoté	Légumineuse	non		oui
	Effet azote sur nb de fruits	non		oui

Le réseau communautaire (chercheurs qui travaillent sur STICS dans le monde) est très vaste, plusieurs chercheurs dans le monde sont en collaboration continu pour le développement du modèle STICS. A cet effet, il y a une amélioration constante du modèle en termes de versions plus adaptés sur diverses conditions (climat, sols, cultures, pratiques culturales....etc. Ces points de force du modèle STICS ont permis d'améliorer la robustesse du modèle afin de Simule une large gamme d'indicateurs agro-environnementaux dans différentes conditions pédoclimatiques avec efficacité.

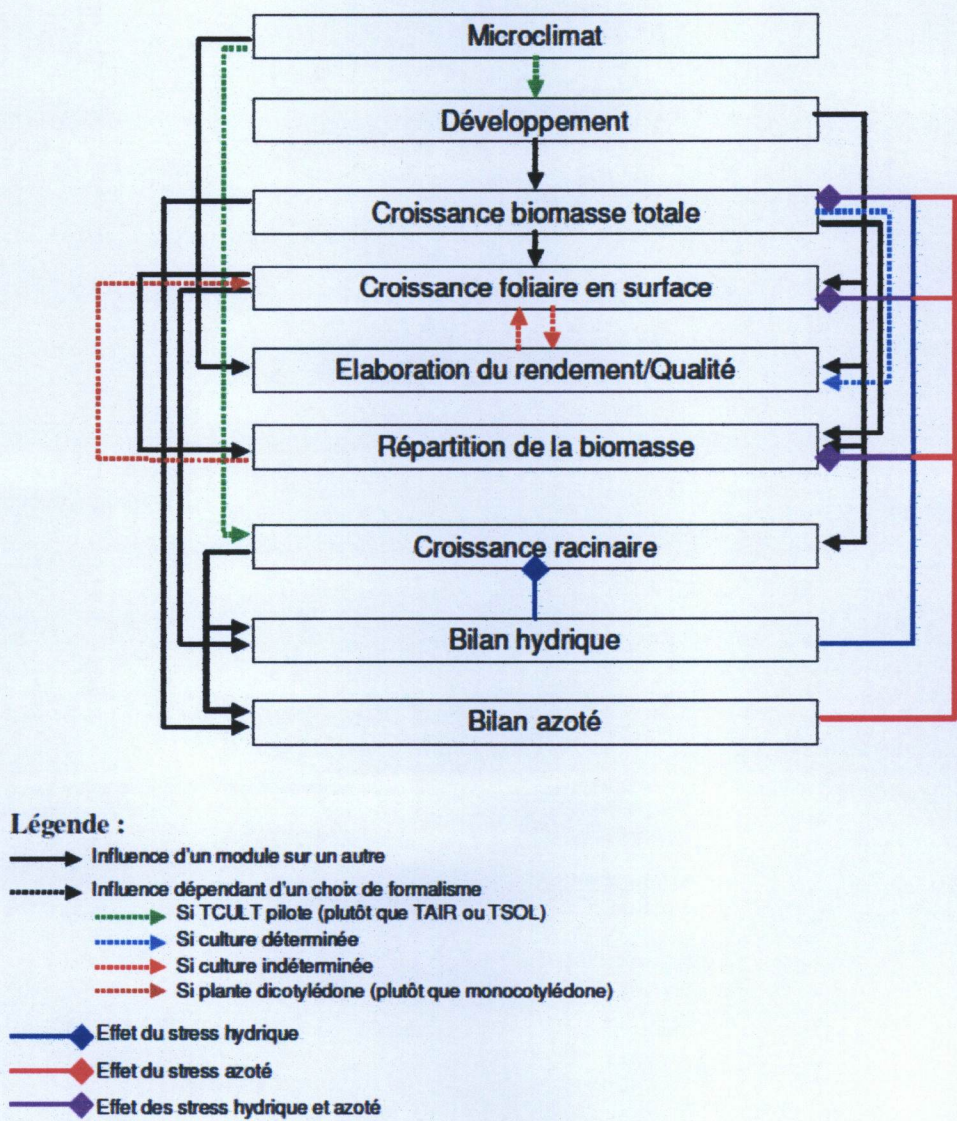


Figure 17 : Modularité du modèle STICS (version 2012)

3.5.4. Validation du modèle STICS sur les systèmes de cultures innovantes

3.5.4.1. Contexte scientifique : culture durable et systèmes innovants

Au cours des dernières décennies, l'intensification des cultures a considérablement contribué à la dégradation de l'environnement, alors que la demande de produits alimentaires agricoles ne cesse d'augmenter. Pour répondre à cette demande alimentaire croissante, les pratiques culturales ont progressivement évolué, ce qui a bien induit de profondes altérations (e.g. environnementales et socioéconomiques) des écosystèmes traditionnels d'ordre agronomique et socio-économiques. Dans plusieurs régions du monde, l'adoption de la « révolution verte » dans le cadre de nouvelles pratiques agricoles (par exemple, nouveaux cultivars, monoculture, sur-fertilisation, pesticides et utilisation intensive des ressources en eau) n'a permis d'augmenter que de manière limitée la productivité agricole, bien qu'elle ait contribué à diminuer les services éco-systémiques notamment à travers leurs impacts sur les sols et les ressources en eau. Afin de soutenir une meilleure gestion des systèmes de culture dans les zones agricoles à faible ressources, de nouvelles pratiques culturales basées sur l'intensification agro-écologique parmi la diversification des espèces sont proposées à l'échelle des exploitations et des parcelles des agriculteurs.

Compte tenu du potentiel de diminution flagrante des nutriments et des ressources en eau pour l'agriculture, la diversification des cultures (par exemple, les cultures intercalaires, les cultures de couverture et la rotation) offre des solutions durables au problème de l'utilisation inadéquate de ces ressources naturelles dans l'agriculture. Ainsi, pour l'agroforesterie (c'est-à-dire le mélange d'arbres fruitiers et de cultures annuelles) et les cultures arables (e.g. céréales et les légumineuses), des changements plus importants dans la conception des cultures devraient être envisagés. Plusieurs recherches récentes ont rapportées les systèmes de cultures intercalaires céréales-légumineuses favorisent et améliorent la résilience face aux chocs agro-environnementaux et socio-économiques. Par exemple, l'efficacité d'utilisation de l'azote (N)

et de l'eau est significativement augmentée dans le blé dur cultivé en association avec le pois chiche, le pois fourrager et la féverole.



3.5.4.2. Importance des modèles de sol-culture dans l'étude de durabilité des systèmes de cultures

Les modèles sol-culture donnent une vue détaillée pour mieux comprendre et diagnostiquer les contraintes agro-environnementales qui pourraient affecter la résilience et la durabilité des cultures. Ils sont également un outil utile pour concevoir et évaluer les systèmes de cultures innovantes (e.g. culture en association à base de légumineuses) en termes de production et conservation de l'environnement. A cet effet, ces modèles sont capables d'intégrer l'analyse d'ensembles de données empiriques et de simuler avec succès les indicateurs agro-écologiques clés (ce dernier permettrait d'assurer une production optimale de services agro-écosystémiques. Selon la littérature récente sur les modèles de systèmes multi-espèces (e.g. CROPSYS, STICS, GEMINI, WaNuLCAS, Hi-sAFé et MOMOS), le bilan hydrique, l'acquisition de nutriments et le rendement sont bien simulés à différents stades de croissance dans les systèmes de cultures intercalaires et de couverture. Ce dernier fournira aux chercheurs et/ou aux agriculteurs un ensemble solide de données et d'informations dont il est nécessaire de consommer plus d'argent et de temps lorsqu'on cherche à les collecter à partir de l'expérimentation.

3.5.4.3. Validation de STICS sur les systèmes de cultures diversifiés

STICS est l'un des modèles sol-culture les plus développés au pas de temps journalier pour prédire et évaluer les performances agro-environnementales des systèmes de culture diversifiés. La simulation quotidienne de la croissance des cultures par STICS fournit une évaluation plus mécaniste des processus agro-physiologiques spécifiques qui sont contrôlés par les pratiques culturales et les conditions pédoclimatiques. Ce modèle a été conçu récemment pour simuler un mélange de cultures dans un système de culture annuel afin

d'évaluer l'effet de l'irrigation, de l'application d'azote, du lessivage de NO_3 , de la densité de plantation et de la rotation des cultures et du mélange.

Cependant, dans la plus part des cas étudiés sur STICS, le modèle générique sol-culture STICS est développé pour les cultures intercalaires sans légumineuses. Pour le système agroforesterie, STICS a été combiné avec le modèle Hi-sAFé pour évaluer la croissance et la production des arbres fruitiers. STICS a déjà été calibré sur un nombre limité de cultures de légumineuses telles que; pois fourrager, soja, féverole, luzerne et haricot vert. Dans la littérature récente, trop peu de références sont disponibles sur l'utilisation de STICS pour la simulation des cultures associées céréales-légumineuses. Cela n'a été rapporté que dans trois articles de la littérature qui se sont focalisés sur les cultures intercalaires blé-pois, orge-pois et blé-fétuque.

3.5.4.4. Calibration du modèle STICS sur les cultures biologiques

Dans la littérature récente, les dernières démarches de formalisme du modèle STICS vise à intégrer les spécificités de l'agriculture biologique affectant les cycles biogéochimiques (e.g. N, P, C...etc) à l'échelle annuelle ou de la succession (pression biotique, diversification des cultures, rôle de la fixation symbiotique de N_2 ...etc). L'hypothèse fondatrice de ces démarches est que le STICS peut être appliqué pour analyser les systèmes de cultures biologiques sans changer ses paramètres globaux calibrés en systèmes de cultures conventionnels. Cependant, une nouvelle paraméterisation est apportée sur le modèle afin de formuler la pression en adventices et en maladies affectant les systèmes en culture biologique qui devraient être plus prononcés par rapport aux systèmes conventionnels.

Dans ce contexte, la méthode de calibration employée pour ajuster le modèle STICS sur ces systèmes de cultures biologiques est la suivante :

-Réalisation d'une étude bibliographique sur la phénologie et l'écophysiologie et sur les modèles existants pour chaque espèce.

-Constitution et qualification d'une base de données par espèce en suivant le cahier des charges de la base de données de validation-test de STICS, et en se donnant des critères de classement en fonction de l'état phytosanitaire de chaque culture dans chaque parcelle.

-Calibration et test de chaque module spécifique suivant la méthode formalisée pour STICS.

3.5.4.5. STICS et raisonnement de la fertilisation azotée en systèmes de cultures intercalaire à base de légumineuses

Après l'eau, la disponibilité d'azote dans le sol est considérée comme le facteur clé qui contrôle la croissance et la variabilité des rendements dans les cultures intercalaires céréales-légumineuses. L'application d'azote a été largement pratiquée pour améliorer le rendement des cultures et la biomasse dans la plupart des agroécosystèmes mondiaux au cours des cinquante dernières années. Néanmoins, les agriculteurs considèrent que le taux d'application d'azote est difficile à ajuster, en particulier lors de la gestion des cultures en association. Cela était probablement dû à un large éventail de facteurs tels que; (i) la proportion de chaque espèce dans le mélange, (ii) l'importance de chaque espèce intercalée quels que soient les objectifs de l'agriculteur et (iii) la variabilité des conditions pédoclimatiques. Pour fournir de meilleures décisions qui peuvent aider les agriculteurs à optimiser l'application de N lors de la gestion des cultures en systèmes d'association, STICS a été récemment validé pour la première fois dans des conditions de fertilisation azotée en système de culture intercalaire pois-blé. Cette avancée dans la calibration et validation du modèle STICS pourrait aider à mieux simuler une grande variabilité des stratégies de fertilisation azotée et à concevoir des systèmes de cultures intercalaires innovants et résilients à base de légumineuses.

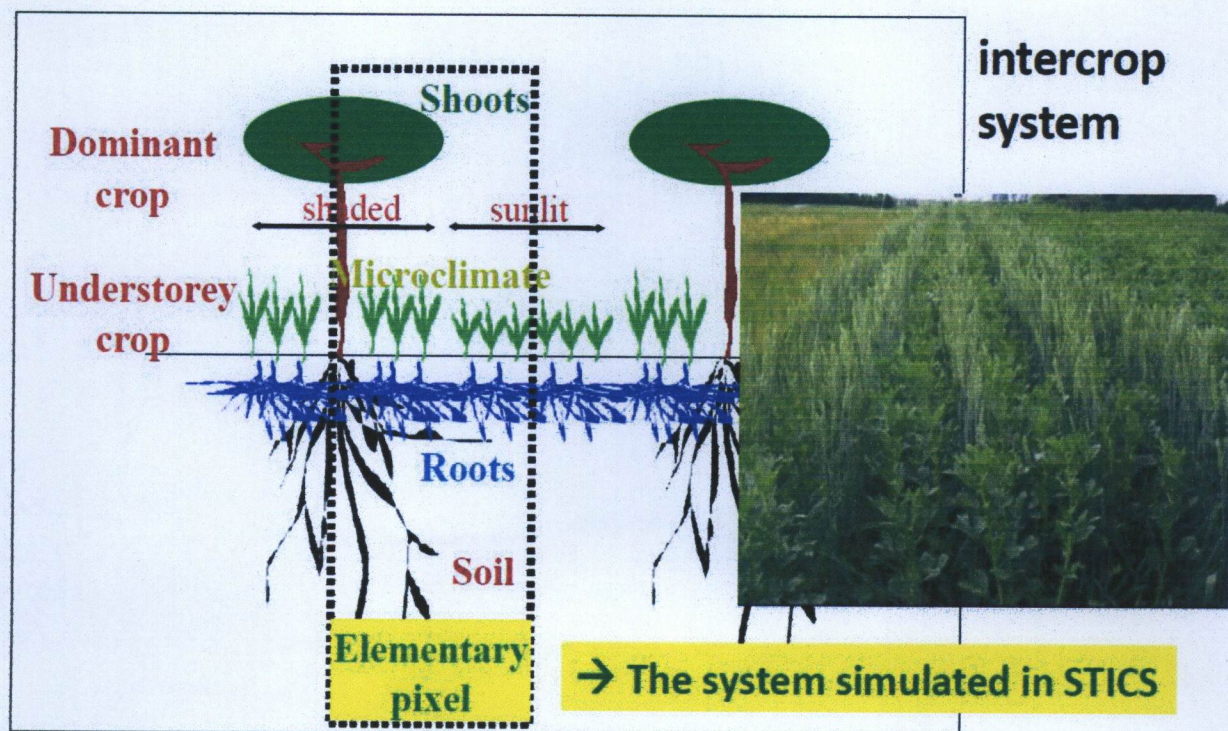
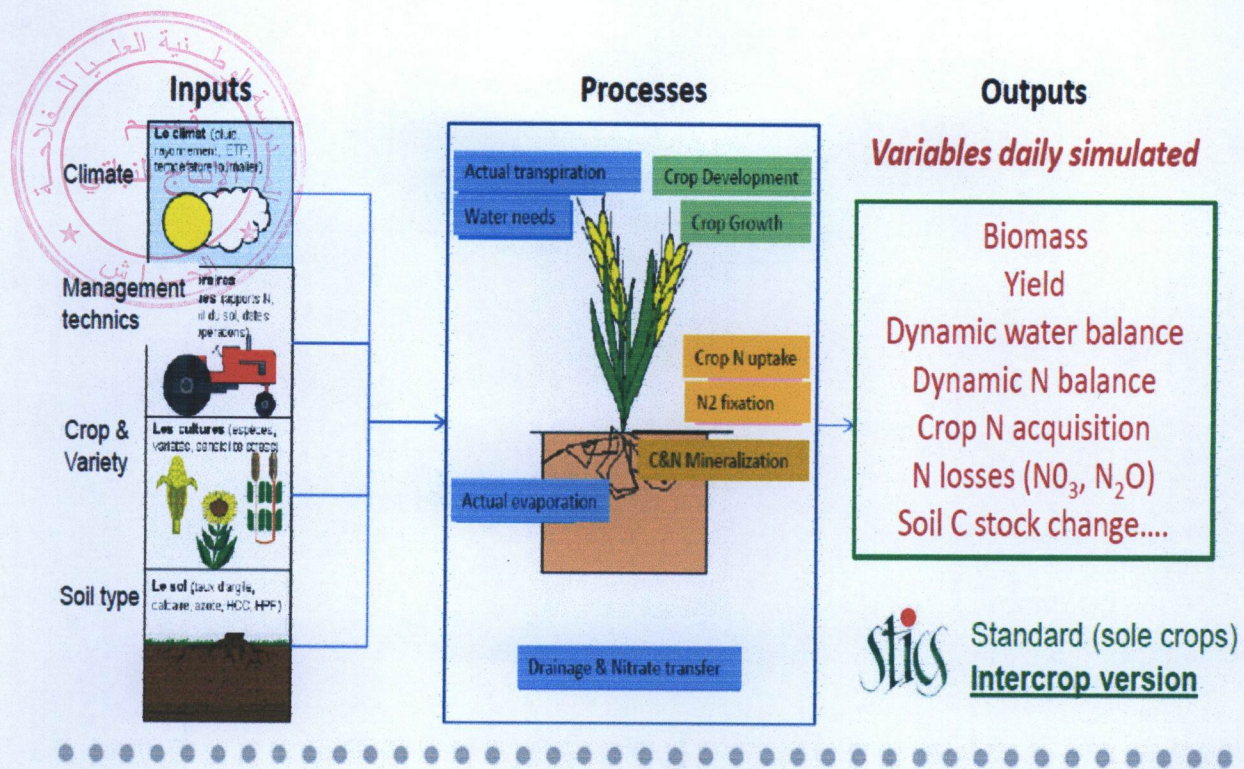


Figure 18 : *En haut* : Principe du fonctionnement du modèle STICS. *En bas* : Conception virtuelle de la version intercropping (système de culture en association légumineuses-céréales) sur le modèle STICS



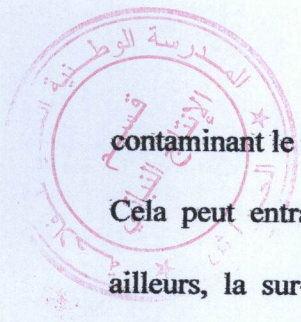
Conclusion

STICS est un modèle très utile pour l'étude de la durabilité et la résilience des systèmes de culture. A travers la simulation de plusieurs variables et indicateurs agroenvironnementaux qui ne sont pas mesurables sur terrain (Ex : Lessivage des nitrates, absorption de la lumière) ou bien qui sont difficile à mesurer sur terrain (Ex: densité racinaire, température de culture), le modèle STICS est considéré comme un outil d'aide à la décision pour la gestion des différentes pratiques culturales. De plus, STICS est adapté pour simuler les différents scénarios possibles qui peuvent contrôler la croissance et les rendements des systèmes de culture : Pédoclimatique (e.g. Différentes pluviométrie, réchauffement climatiques), ou pour les pratiques culturales (date de semis, fertilisation, travail du sol...). Enfin, l'utilisation du modèle STICS va permettre sans doute ; une meilleure évaluation des systèmes de cultures et un gain de temps et d'argent par rapport à l'expérimentation.

3.6. Modèle BROWSE et évaluation des risques d'application des pesticides sur la santé humaine

3.61. Contexte générale sur les risques causés par l'utilisation des pesticides

L'utilisation des pesticides est une pratique indispensable pour maintenir et améliorer plus de 30% des produits agricoles dans le monde. Ils ont été appliqués par les agriculteurs pour protéger les cultures contre les dommages causés par les mauvaises herbes, les ravageurs et les insectes. Les pesticides sont principalement appliqués pour améliorer le rendement des cultures, ce qui permet d'assurer un approvisionnement énorme en produits alimentaires; surtout avec l'augmentation actuelle de la population mondiale. L'utilisation accrue de pesticides a des effets néfastes sur l'agroenvironnement et les performances socio-économiques des systèmes agricoles. La lixiviation des pesticides pourrait affecter en

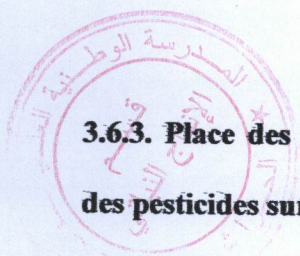


contaminant le sol, les cultures et la surface de l'eau avec leurs substances chimiques toxiques. Cela peut entraîner la destruction et la perte de la biodiversité végétale et animale. Par ailleurs, la sur-utilisation des pesticides dans le cadre de la gestion conventionnelle des cultures pourrait entraîner une diminution de la rentabilité économique des agriculteurs en raison du coût élevé des pesticides chimiques.

3.6.2. Application des pesticides et santé humaine

L'augmentation de l'utilisation de pesticides non seulement augmente les dommages environnementaux, mais augmente également le risque pour la santé humaine en raison des quantités absorbées de pesticides. L'exposition humaine (celle de l'agriculteur, opérateur et résident) aux pulvérisations de pesticides et aux résidus de pesticides accumulés dans les produits alimentaires est généralement associée à un large éventail de risques pour la santé, allant d'effets toxiques à court terme à des effets toxiques à long terme. A cet effet, l'adoption de pratiques innovantes de gestion des cultures et des sols est considérée comme l'une des stratégies les plus durables pour améliorer les performances environnementales, agronomiques, techniques et économiques.

De plus, des recherches récentes ont montré que l'adoption de système de culture innovant à faible intrants conduirait à réduire la dégradation de l'environnement et la dépendance à l'utilisation de produits phytopharmaceutiques.. Des études récentes ont évalué et comparé les risques liés à l'application de pesticides dans les systèmes de culture conventionnels et innovants. Ces dernières études ont montré que des pratiques culturelles innovantes avec de faibles intrants réduiraient le danger pour la santé humaine par rapport aux systèmes de culture conventionnels, alors qu'il a été observé un risque inacceptable pour la santé humaine lié à l'utilisation de pesticides dans le cadre du travail du sol de conservation.



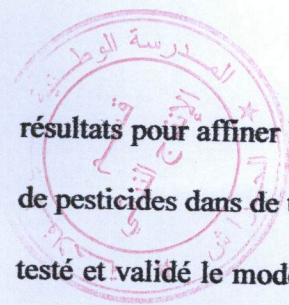
3.6.3. Place des approches de modélisation dans l'évaluation des impacts d'utilisation des pesticides sur santé humaine

Grâce aux approches de modélisation prédictive, des modèles mécanistes ont été développés au cours des dernières années afin de comprendre et évaluer mieux l'exposition de la santé humaine aux produits phytosanitaires (Butler Ellis et al., 2010). Parmi ces approches, il n'y a eu qu'un nombre limité d'études axées sur les systèmes de culture innovants (c'est-à-dire la gestion des résidus de culture, les cultures mixtes, les pratiques de rotation et de travail du sol). Dans ce contexte, des projets européens récents ont développé de nouvelles approches de modélisation de l'exposition humaine aux risques liés aux pesticides. Cela a contribué à fournir des modèles robustes pour identifier le devenir du pesticide dans le système culture-sol.

Citant l'exemple dans ce cours, les modèles EUROPOEM (EUROpean Predictive Operator Exposure Model) et BREAM (Bystander and Resident Exposure Assessment Model) ont été développés pour évaluer l'exposition des résidents et des passants aux pesticides appliqués en agriculture (van Hemmen, 2001 ; Anon, 2011). Cependant, ces derniers modèles sont paramétrés selon des bases de données réglementaires générales et incomplètes, dans lesquelles les pratiques culturales courantes et les voies d'exposition sont mal intégrées.

3.6.4. Utilisation du modèle BROWSE dans l'évaluation de l'exposition de la santé humaine aux risques de l'application de pesticides

Le BROWSE (Bystanders, Residents, Operators and WorkerS Exposure) est l'un des modèles les plus mécanistes qui a été formulé selon les distributions de probabilité d'exposition aux pesticides. Par rapport aux modèles précédemment développés, BROWSE vise à améliorer et à décrire des scénarios plus réalistes pour analyser un large éventail de pratiques culturales couramment adoptées par les agriculteurs à ce jour. Cela permettrait de simuler divers



résultats pour affiner l'évaluation des risques pour la santé humaine parmi l'utilisation globale de pesticides dans de telles pratiques culturales. Une étude, celle de Lammoglia et al. (2017) a testé et validé le modèle BROWSE pour l'évaluation des risques des pesticides pour la santé humaine dans les systèmes de couverture végétale basés sur les grandes cultures.

3.6.5. Présentation du modèle BROWSE

3.6.5.1. Objectif du modèle BROWSE

BROWSE (Bystanders, Residents, Operators and WorkerS Exposure) est un modèle mécaniste développé par le projet européen BROWSE pour prévoir l'exposition humaine aux différentes formulations liquides et solides (y compris les traitements des semences) de pesticides pour 3 catégories (voir figure 23) de personnes qui sont :

- Les opérateurs (main d'œuvre ou agriculteurs qui participent dans les opérations de traitements des cultures par les produits pesticides)
- Les travailleurs (tous les travailleurs qui participent dans les divers interventions et pratiques culturales au sein de l'exploitation agricole)
- Les résidents (familles des agriculteurs et population résidentes à côté des exploitations agricoles).

المدرسة الوطنية للتكنولوجيا
التقنية
browse

Assessment Scenario Operator Resident/Bystander Console Results - Operator Results - Resident/Bystander

Assessment

Run title

Assessor name

Scenario

Crop name

Crop type

Application technique

Scenario

Calculate exposure for

☒ Operator

☒ Resident/Bystander

☐ Worker

Default exposure percentile %

Product

Product name

Active substance name

Compound code in MCRA (if applicable)

N.B. Browse software is only applicable to products that are applied with water as the carrier.

Product formulation type

Concentration (active substance) in product g/l

Exposure

AOEL mg/kg body weight/day

Acute AOEL mg/kg body weight/day

Dermal absorption of product %

Dermal absorption of in use dilution %

Oral absorption %

Skin to mouth transfer factor %

Percentage of hand area making contact with mouth %

Inhalation absorption factor %

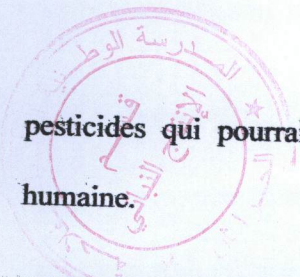
Scenario

Boom spraying, mixing and loading for arable field crops and outdoor fruit and vegetables e.g. grassland, cereals, oilseeds, root & tuber vegetables, low crop height fruit, bulb vegetables, brassicas, leaf vegetables & fresh herbs, legumes and stem vegetables.

Active Windows

Figure 19 : Structure de l'interface de la plateforme de modélisation du modèle BROWSE

L'objectif principal du modèle BROWSE est la détermination de la distribution de probabilité des expositions humaines au risque global pour les systèmes de cultures traités par des produits de pesticides. Les résultats de simulation de ce modèle contribueront à la sélection des pratiques de gestion des sols et des cultures les plus efficaces pour réduire les risques humains liés à l'utilisation de pesticides. A cet effet, la validation du modèle BROWSE permet sans doute l'exploration de l'intérêt de l'approche de modélisation pour concevoir des stratégies innovantes (combinaison de gestion des sols et des cultures) d'utilisation des



pesticides qui pourraient diminuer les risques de l'utilisation des pesticides sur la santé humaine.

3.6.5.2. Paramètres d'entrés du modèle BROWSE

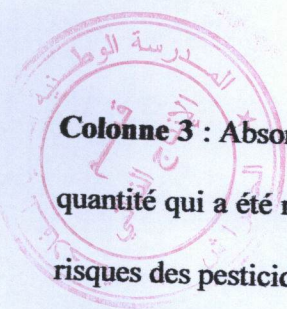
Le calibrage BROWSE se fait sur les données collectées lors d'entretiens en exploitations agricoles (consultations des agriculteurs et des parties prenantes) et des connaissances d'experts pour simuler les risques pour la santé humaine (opérateur et résident) après l'application de pesticides. La gestion des cultures et des sols sera également incluse dans l'évaluation des risques humains (par le modèle BROWSE) pour évaluer les niveaux d'exposition et les risques toxicologiques de chaque système de culture (culture annuelle, agroforesterie, monoculture, rotation...etc) et la pratique du travail du sol (labour conventionnel et non labour). Cela permettrait de construire un meilleur paramétrage du modèle BROWSE pour les systèmes de culture innovants et les systèmes de culture conventionnels correspondants.

3.6.5.3. Paramètres sortie du modèle BROWSE

Les outputs du modèles BROWSE sont généralement répartis sur trois catégories de résultats à savoir (voir le tableau en ci-dessous) :

Colonne 1 : Potentiel exposure (mg/kg bodyweight/day) : c'est l'estimation de quantité d'exposition aux pesticides, généralement c'est la quantité qui se retrouve directement sur la peau de l'individu, ou en contact de son nez ou de sa bouche (voir le tableau en ci-dessous).

Colonne 2 : Actual exposure (mg/kg bodyweight/day) : Elle correspond à des valeurs corrigées (application d'un taux de correction) sur la base de l'équipement de protection utilisé, matériel utilisé par les agriculteurs ou opérateurs lors du traitement.



Colonne 3 : Absorbed amount (mg/kg bodyweight/day) : Ces valeurs estimées représentent la quantité qui a été réellement absorbée par toute surface du corps de celui qui sera exposé aux risques des pesticides.

Tableau 3 : Exemple sur les résultats de simulation par le modèle BROWSE

Activity	Exposure route	Potential exposure (mg/kg bodyweight/day)	Actual exposure (mg/kg bodyweight/day)	Absorbed amount (mg/kg bodyweight/day)	ACEL
Mixing & loading	Time	55.5 mins			
	Dermal (whole body)	2.81	2.81	2.81	2806.4%
	Dermal (hands)	2.61	2.61	2.61	2605.8%
	Dermal (head)	0.0572	0.0572	0.0572	57.2%
	Dermal (total)	5.72	5.72	5.72	5724.2%
	Inhalation	0.0205	0.0205	0.0205	20.5%
	Ingestion	0.0784	0.0784	0.0784	78.4%
	TOTAL	5.90	5.90	5.90	5903.0%
Boom spraying	Time	130.21 mins			
	Dermal (whole body)	0.0337	0.0337	0.0337	33.7%
	Dermal (hands)	0.188	0.188	0.188	187.6%
	Dermal (head)	0.0141	0.0141	0.0141	14.1%
	Dermal (total)	0.235	0.235	0.235	235.4%
	Inhalation	0.00191	0.00191	0.00191	1.9%
	Ingestion	0.0169	0.0169	0.0169	16.9%
	TOTAL	0.255	0.255	0.255	255.4%
Mixing & Loading + Boom spraying	Time	185.71 mins			
	Dermal (whole body)	2.84	2.84	2.84	2843.3%
	Dermal (hands)	2.81	2.81	2.81	2810.3%
	Dermal (head)	0.0725	0.0725	0.0725	72.5%
	Dermal (total)	5.97	5.97	5.97	5972.3%
	Inhalation	0.0236	0.0236	0.0236	23.6%
	Ingestion	0.0970	0.0970	0.0970	97.0%

3.9. Modèle CROPSYST et simulation du fonctionnement des systèmes de culture

3.9.1. Généralités sur le modèle CropSyst

CropSyst est un modèle de simulation des systèmes de culture pluriannuels, multicultures.

C'est un modèle mécaniste qui simule à pas du temps journalier, il a été développé pour servir d'outil analytique pour étudier les effets du climat, des sols et de la gestion des pratiques culturales sur les systèmes de culture. CropSyst simule les bilans hydriques du sol, les bilans nutritifs (N et P), le cycle du carbone, la croissance et le rendement des cultures, la production de résidus, l'érosion du sol et d'autres paramètres selon les options de gestion définies par l'utilisateur (e.g. s rotations, le travail du sol, la fertilisation et la programmation et les options d'irrigation pour faire face aux épisodes de sécheresse).

CropSyst peut donner un aperçu de la pollution à l'azote, des émissions de gas à effet de serre (GES) et de la séquestration de C.

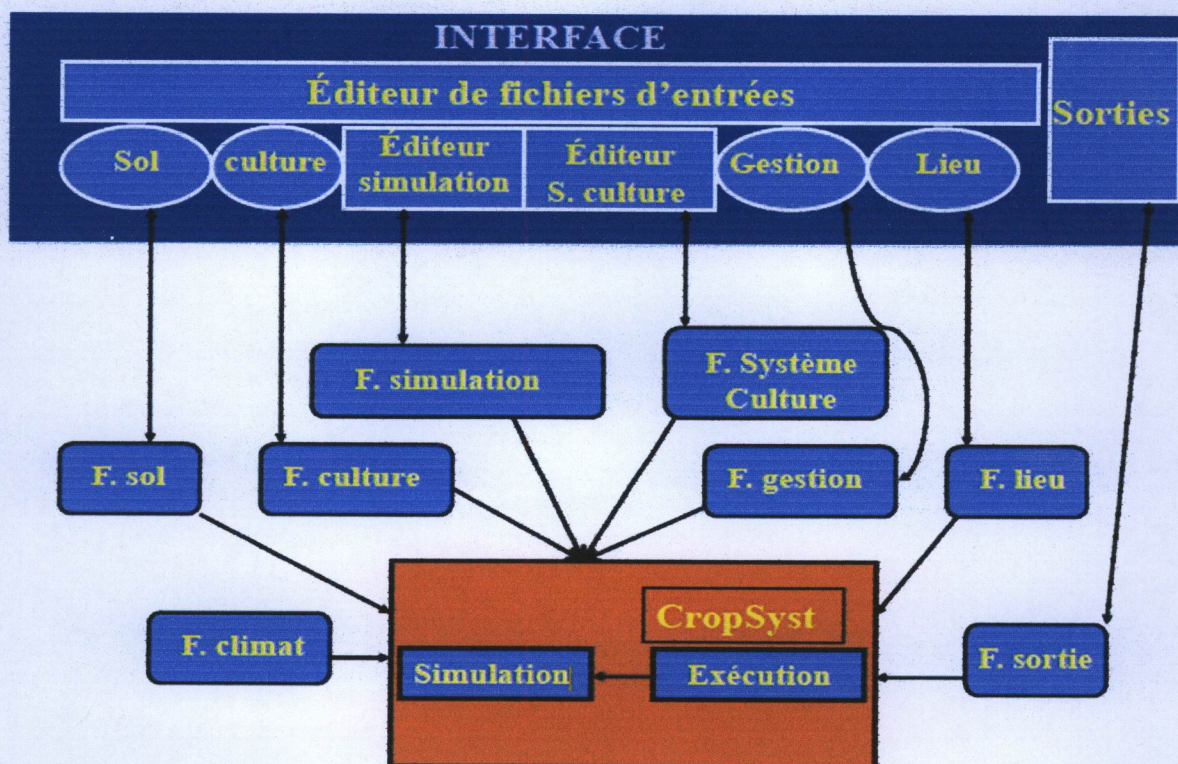


Figure 20 : Interface du modèle CROPSYST

3.9.2. Description du modèle CropSyst

Le modèle est destiné à la simulation de la croissance des cultures sur une unité de surface (sur champs) en mètre carré. La croissance est décrite au niveau de la plante entière et sur sur l'ensemble de ses compartiments (tige, feuille, pétiole...etc). L'intégration est effectuée avec des pas de temps journaliers en utilisant la méthode d'Euler.

Note aux étudiants : La description complète du modèle CropSyst est disponible dans le manuele d'utilisation établi par Stockle et Nelson. Cependant , les sous-modèles d'azote et d'eau (ou bien modules) dans CropSyst et une description générale de la simulation de croissance sont actualisés sous la plateforme de CIRAD, Montpellier, France.

a. Bilan hydrique sur CropSyst

Le bilan hydrique du modèle comprend les précipitations, l'irrigation, le ruissellement, l'interception, l'infiltration d'eau, la redistribution de l'eau dans le profil du sol, la transpiration des cultures et l'évaporation. Les utilisateurs peuvent sélectionner différentes méthodes pour calculer la redistribution de l'eau dans le profil du sol et l'évapotranspiration de référence. La redistribution de l'eau dans le sol est gérée par une simple approche en cascade ou par une approche de différences finies pour déterminer les flux d'eau du sol. CropSyst propose trois options pour calculer l'ET de référence de l'herbe. Dans l'ordre décroissant des données météorologiques requises, ces options sont : le modèle Penman-Monteith , le modèle Priestley-Taylor et une implémentation plus simple du modèle Priestley-Taylor qui ne nécessite que la température de l'air. L'ET de la culture est déterminé à partir d'un coefficient de culture à couvert complet et d'une couverture au sol déterminée par l'indice de surface foliaire du couvert.

b. Bilan azoté sur CropSyst

Le bilan d'azote dans CropSyst comprend les transformations de N, la sorption d'ammonium, la fixation symbiotique de N, l'azote atmosphérique, la demande en N



de la culture et l'absorption de N de la culture. Les transformations de l'azote de la minéralisation nette, de la nitrification et de la dénitrification sont simulées. Les bilans d'eau et d'azote interagissent pour produire une simulation du transport de l'azote dans le sol. Les bilans chimiques (pesticides, salinité), y compris la décomposition et l'absorption des pesticides, sont également conservés et interagissent avec le bilan hydrique. Toutes les interactions entre les différents compartiments du modèle sont vérifiées à chaque pas de temps et des erreurs sont signalées en cas de dépassement des valeurs seuil définies.

c. Simulation de la croissance

Le développement des cultures est simulé en fonction du temps thermique nécessaire pour atteindre des stades de croissance spécifiques. L'accumulation du temps thermique peut être accélérée par le stress hydrique. Le temps thermique peut également être modulé par les exigences de photopériode et de vernalisation chaque fois que cela est pertinent. La croissance quotidienne des cultures est exprimée en augmentation de la biomasse par unité de surface au sol. Le modèle tient compte de quatre facteurs limitant la croissance des cultures : l'eau, l'azote, la lumière et la température. Étant donné la voie commune d'échange de carbone et de vapeur des feuilles, il existe une relation prudente entre la transpiration des cultures et la production de biomasse. L'accumulation quotidienne de biomasse est calculée comme suit (équation 1) :

$$B_T = K_{BT} T / VPD \text{ [Eq. 1]}$$

Où BT est la production de biomasse dépendante de la transpiration ($\text{kg m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$), T est la transpiration réelle ($\text{kg m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$), et VPD est le déficit quotidien moyen de pression de vapeur de l'air (kPa). La relation Tanner-Sinclair a l'avantage de capturer l'effet de l'humidité atmosphérique du site sur l'efficacité d'utilisation de la transpiration. Cependant, cette relation



devient instable à faible **VPD** ; en effet, cela prédirait une croissance infinie à un **VPD** proche de zéro. Pour surmonter ce problème, une deuxième estimation de la production de biomasse est calculée selon Monteith (équation 2)

$$B_L = e I_{PAR} \text{ [Eq. 2]}$$

Où **BL** est la biomasse dépendante de la lumière, la production ($\text{kg m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$), *e* est l'efficacité d'utilisation de la lumière (kg MJ^{-1}) et **IPAR** est la quantité quotidienne de rayonnement photosynthétiquement actif intercepté par les cultures ($\text{MJ}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$). Chaque jour de simulation, le minimum de **BT** et **BL** est pris comme production de biomasse pour la journée. Bien que le paramètre de l'équation 2 (Eq. 2) inclue l'effet du régime de température prévalant lors de sa détermination expérimentale, les limitations de température au début de la croissance ne sont pas capturées et une seule valeur est déterminée pour la période végétative ou, plus généralement, pour toute la saison de croissance. . Cependant, des mesures plus détaillées montreront une diminution de *e* au début de la croissance en raison de la basse température. Ne pas tenir compte de cet effet de température peut entraîner une surestimation de la production de biomasse au début de la croissance, en particulier dans le cas des cultures d'hiver. Pour tenir compte des effets de l'azote sur la production de biomasse, le minimum de **BT** et **BL** est utilisé comme base pour déterminer la production de biomasse dépendante de l'azote (**BN**), celui-ci est représenté par l'équation 3 en ci-dessous:

$$B_N = \text{Min} \{B_T, B_L\} [1 - (N_{pcrit} - N_p) / (N_{pcrit} - N_{pmin})] \text{ [Eq. 3]}$$

Où **BN** est en $\text{kg m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$, *N_p* est la concentration en azote de la plante (kg kg^{-1}), *N_{pcrit}* est la concentration critique en N de la plante (kg kg^{-1}) en dessous de laquelle la croissance est limitée, et *N_{pmin}* est l'azote minimum de la plante concentration (kg kg^{-1}) à laquelle la croissance s'arrête. Les valeurs de *N_{pcrit}* et *N_{pmin}* (ainsi que de la concentration maximale



en azote des plantes, nécessaires pour établir la demande en azote des cultures) fluctuent en fonction de la biomasse accumulée, suivant le concept de dilution de croissance.

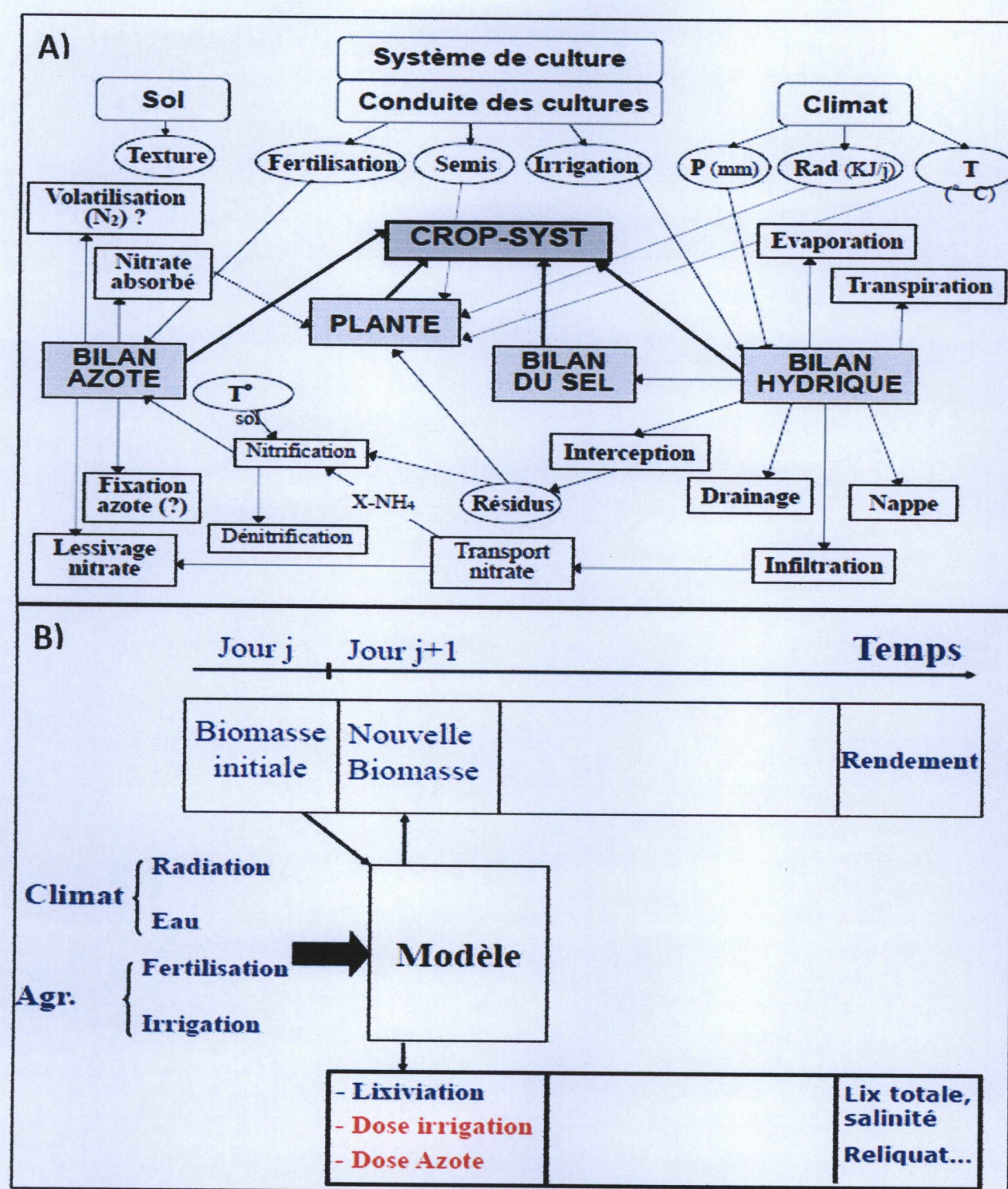


Figure 21 : Description (A) et principe du fonctionnement (B) du modèle CropSyst



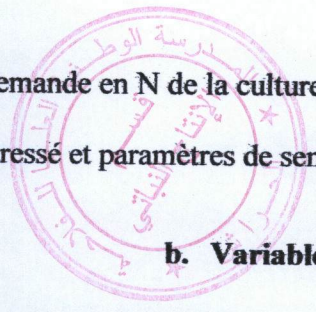
3.9.3. Paramètres d'entrée et variables de sortie du modèle CropSyst

a. Paramètres d'entrée (Inputs)

Quatre fichiers de données d'entrée sont nécessaires pour exécuter CropSyst : les fichiers Météo, Sol, Culture et Gestion. La séparation des fichiers permet un lien plus facile des simulations CropSyst avec les logiciels les plus utilisés pour manipuler le CropSyst. Un fichier de contrôle de simulation combine les fichiers d'entrée comme souhaité pour produire des exécutions de simulation spécifiques. De plus, le fichier de contrôle détermine le jour de début et de fin de la simulation, définit les rotations de cultures à simuler et fixe les valeurs de tous les paramètres nécessitant une initialisation (avec valeur initiale).

Le fichier de sol comprend la capacité d'échange cationique et le pH du sol de surface, requis pour la volatilisation de l'ammoniac, les paramètres de l'approche du nombre de courbes (calcul du ruissellement), la texture du sol de surface (pour le calcul de l'érosion) et cinq paramètres spécifiés par couche de sol : épaisseur de la couche, capacité au champ, point de flétrissement permanent, densité apparente et coefficient de dérivation.

Cependant, le fichier Crop permet aux utilisateurs de sélectionner des paramètres pour représenter différentes cultures et cultivars à l'aide d'un ensemble commun de paramètres. Ce dossier est structuré dans les sections suivantes : **Phénologie** (besoins de temps thermique pour atteindre des stades de croissance spécifiques, modulés par les exigences de photopériode et de vernalisation si nécessaire), **Morphologie** (LAI maximum, profondeur racinaire, surface foliaire spécifique et autres paramètres définissant les caractéristiques de la canopée et des racines), **Croissance** (efficacité d'utilisation de la transpiration et efficacité d'utilisation de la lumière, paramètres de réponse au stress, etc.), **Résidus** (paramètres de décomposition et d'ombrage pour les résidus de culture), **Paramètres d'azote** (définissant la



demande en N de la culture et l'absorption racinaire), *Indice de récolte* (indice de récolte non stressé et paramètres de sensibilité au stress) et tolérance à la salinité.

b. Variables de sortie (Outputs)

Le modèle CropSyst a été appliqué à plusieurs cultures (maïs, blé, orge, soja, pois fourager, pois chiche, le haricot vert sorgho.....etc) et validé sur plusieurs régions dans le monde (Afrique du Nord, ouest des États-Unis, sud de la France, nord et sud de l'Italie, nord de la Syrie, nord de l'Espagne et Australie occidentale), généralement avec de bons résultats et aussi quelques problèmes de simulation, notamment pour des applications à des conditions non simulées par le modèle (par exemple, la difficulté ou l'absence du CROPSYST sur d'autres nouvelles espèces annuelles ou pluri-annuelles). La qualité et/ou le niveau de détail des données disponibles sont souvent une contrainte pour une évaluation plus approfondie du modèle. Les analyses statistiques effectuées sur les outputs de simulation par CropSyst (biomasse, rendement en grain, indice de la surface foliaire, bilan hydrique, lixiviation de nitrates, acquisition de l'azote...etc) ont indiqué une performance satisfaisante de CropSyst dans ces évaluations. Bien que cela ne soit pas montré ici, un bon accord avec l'évolution saisonnière observée de l'ET (évapotranspiration), du LAI (indice de la surface foliaire) et de la biomasse a été trouvé récemment pour les données relatives à plusieurs agroécosystèmes dans le monde, ce dernier va permettre sans doute de fournir une bonne base pour une simulation adéquate de la biomasse et du rendement au moment de la récolte, particulièrement pour les nouvelles espèces calibrées sur CropSyst.

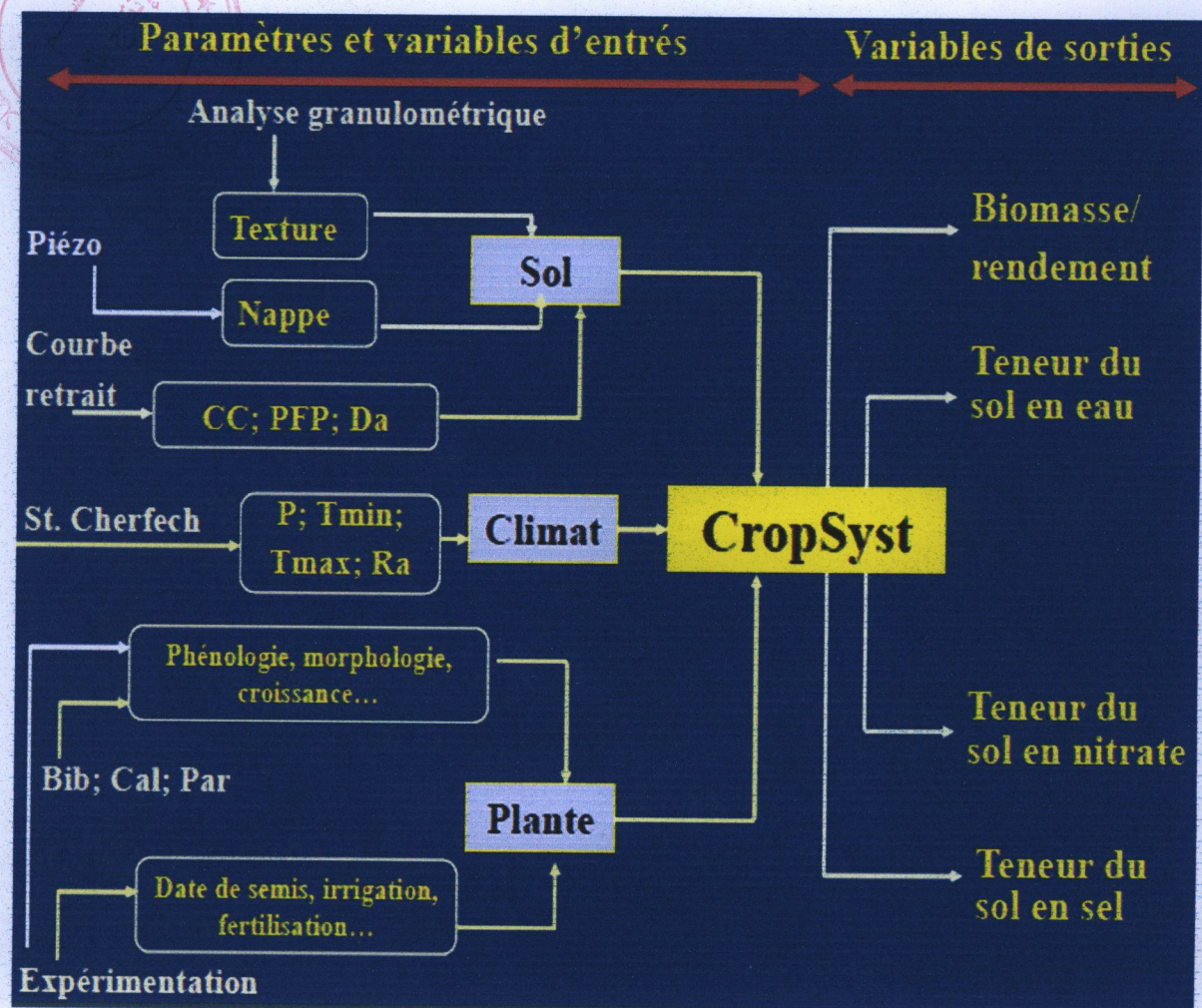
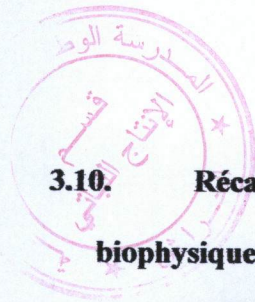


Figure 22 : Les différents inputs et outputs du modèle CropSyst



3.10. Récapulatif sur le domaine de calibration et validation des modèles biophysiques mécanistes (e.g. STICS, BROWSE, MOMOS et CROPSYST)

3.10.1. Potentiel des modèles biophysiques mécanistes

Les modèles mécanistes sont des outils très puissants pour étudier les systèmes de cultures très complexes. Ces modèles sont adaptés sur les différents niveaux d'interaction entre l'ensemble des compartiments du système sol-plante-atmosphère et microorganismes.

Le caractère mécaniste de ces modèles permet la validation de ces derniers sur divers conditions pédoclimatiques, pratiques culturales et environnementales. A cet effet, ces modèles sont considérés comme des outils d'aide à la décision très efficaces pour analyser, étudier et explorer la durabilité des agroécosystèmes.

La possibilité de couplage de ces modèles avec des modèles climatiques va permettre sans doute l'extension de ces modèles sur une gamme climatique très large.

Tableau 4 : Différence entre les modèles mécanistes et statiques

Modèle mécaniste	Modèle statistique
Processus orienté selon les objectifs	Descriptif et spécifique
Analyser plusieurs compartiments : (sol, plante, climat...)	Compartiment isolé
Interaction non linéaire	Relation : cause-effet
Objectifs multiples	Répond à une seule question
Exemple : Evaluation du risque climatique sur le rendement, le drainage, le lessivage	Exp: effet du sel sur l'élaboration de la matière sèche.

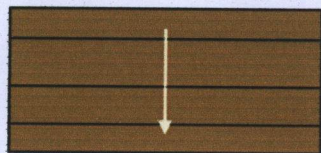


3.10.2. Principe et précaution de simulation par les modèles mécanistes

Avant de commencer une simulation il est primordial d'avoir une parfaite connaissance :

(i) comment le modèle représente les processus biologiques, physiques et chimiques du système réel et (ii) du système et le modèle qui représente ce système. Sinon, il serait impossible d'interpréter correctement la différence entre les résultats simulés et observés.

Méthode cascade: sous-estimation du bilan hydrique sur sol argileux, pas d'effet sur sol sablonneux, moins exigeant en paramètre



Méthode « élément fini »: estimation correcte du bilan hydrique sur sol argileux, plus exigeant en paramètre

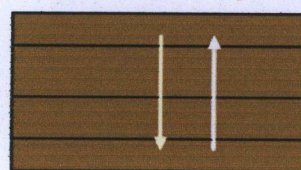


Figure 23 : Exemple de certaines méthodes d'élaboration de scénarios de simulation sur le modèle CropSyst

3.10.3. Principe de calibration des modèles

La calibration est indispensable pour deux raisons principales:

- ☐ Pour une meilleure sélection des inputs en décrivant correctement le système à simuler: cycle de la culture, type de sol, climat...
- ☐ pour tenir compte de l'empirisme et des hypothèses qui composent les équations et les modules du modèle. Modèle mécaniste#modèle statistique.

Note : Le dispositif expérimental ainsi que les mesures peuvent être une source importante d'erreur. L'estimation des paramètres se fait soit : Manuellement : généralement le nombre de paramètres estimé est limité car c'est lourd à faire, difficile de croiser plusieurs paramètres ce qui nécessite l'optimisation paramètre par paramètre.

3.10.4. Matrice d'équations et variables décrivant les systèmes de culture sur les modèles mécanistes

L'ensemble des processus physiologiques, morphologique, biochimiques et écologiques qui se déroulent entre l'ensemble des compartiments du système modélisé (système de culture) sont formulés quantitativement par un jeu d'équations mathématiques. Cette formulation représente le moteur principale avec lequel le modèle exécute ses simulations sur l'axe spatio-temporelle (pas du tems journalier, bilan d'eau et nutriments dans le sol et la plante....etc). Le diagramme relationnel entre ces différents processus et compartiment est représenté dans la figure en ci-dessous (figure 24).

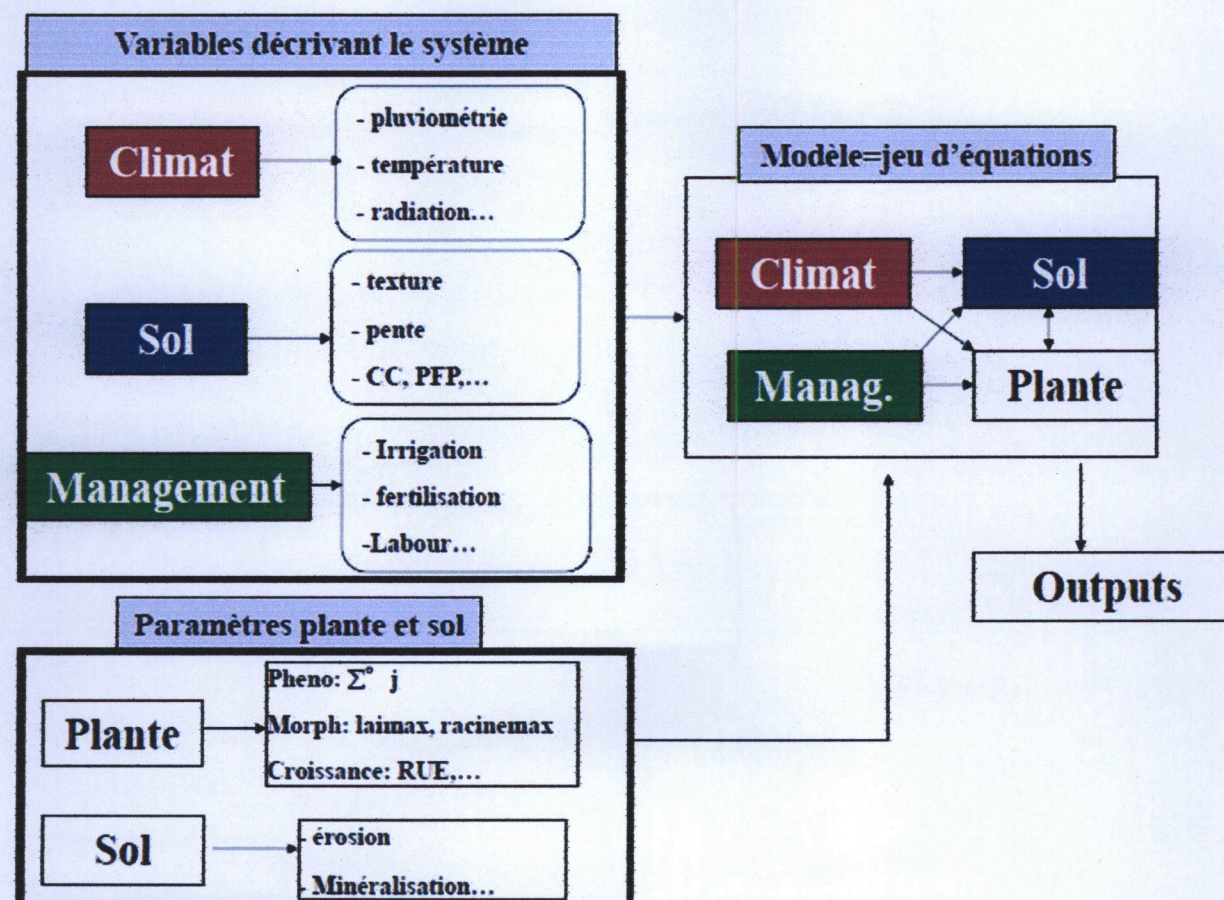


Figure 24 : Diagramme représentatif du principe du fonctionnement des modèles des systèmes de cultures



Chapitre 4: Enquête agricole



4. Enquête agricole

4.1. Modes de recueil de l'information agricole

Tout recueil d'informations est conçu en fonction d'un objectif, et cet objectif conditionne la manière dont seront collectées les données et les questions auxquelles on tentera d'apporter une réponse. On considère deux modes de recueil d'informations et de données biologiques : l'expérimentation et l'enquête.

a/ Expérimentation

En expérimentation, on cherche à comparer les effets de différents traitements sur une population expérimentale. Les données doivent être "fabriquées" par l'expérimentateur de manière à respecter dans la mesure du possible le principe : "les traitements sont comparés, toutes choses étant égales par ailleurs". Aussi, la caractéristique essentielle de l'expérimentation est de créer des conditions contrôlées. La population expérimentale est choisie dans ce but. La démarche de l'expérimentation est donc rigoureusement analytique. En effet, un résultat d'essai est relatif à une situation particulière : celle créée par les conditions de l'expérience, contrôlables ou non (par exemple, dans le domaine agronomique, la variété, la composition biochimique des molécules, les techniques culturales, le type de sol, les conditions climatiques, etc.).

Le dispositif expérimental doit assurer que les suppositions nécessaires à l'analyse statistique sont réalisées et permettre une bonne précision des résultats, en spécifiant la manière d'affecter les traitements aux unités expérimentales.

b/ Enquête

L'autre mode de recueil d'informations est l'enquête (appelée ainsi ou bien sondage lorsque les observations portent sur des personnes et échantillonnage lorsque les observations portent sur



des aliments, des animaux ou des objets). Dans une enquête, on cherche à collecter des informations sur une population, en la représentant par une partie de celle-ci, l'échantillon. La notion de représentativité de la population par l'échantillon est donc essentielle dans une enquête. On dit qu'un échantillon est représentatif si tout individu de la population peut figurer dans l'échantillon avec une probabilité non nulle et connue. De plus, on appelle base de sondage, la liste exhaustive des individus de la population.

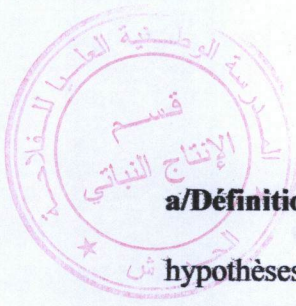
4.2. Généralités sur les enquêtes agricoles

L'enquête agricole par entretien avec les agriculteurs sur terrain (ou par communication directe ou indirecte) consiste à collecter des données primaires sur un échantillon représentatif (plusieurs exploitations agricoles dans une commune, wilaya, pays...etc) afin de prendre une décision et résoudre une problématique. L'enquête agricole est un vrai projet qui implique des objectifs clairs, une méthodologie et une planification rigoureuse. Ce dernier nécessite un investissement important en termes de temps et d'argent.

4.2.1. Etape de la réalisation d'une enquête agricole

4.2.1.1. La préparation et la planification d'une enquête

En premier lieu, avant de lancer une enquête agricole, la préparation ainsi que la planification de différentes tâches et composantes de l'enquête est primordiale. Généralement, les différents enquêteurs s'accordent sur un ensemble d'étapes dont le premier travail consiste à proposer un cadrage solide des objectifs de l'enquête, bien identifier la question à traiter, ensuite définir la population concernée et l'ensemble de méthodes qui seront adoptés pour l'échantillonnage. De plus, il est nécessaire de cibler les différents outils logistiques (informatique, logiciels, programme, matériel...etc) pour la collecte, le traitement, l'analyse et la correction des données. A cet effet, la bonne préparation de l'enquête nécessite :



a/Définition des objectifs : L'enquêteur doit définir précisément les objectifs ainsi que les hypothèses de son étude (que souhaitons étudier et savoir). Les objectifs devraient être également clairs, précis et opérationnels de l'enquête agricole menée. Par exemple, parmi les objectifs courants de l'enquête agricole généralement étudiés ici en Algérie : Enquête auprès des agriculteurs (Exploitation agricole) qui visent à identifier les facteurs qui affectent les rendements des céréales (e.g. blé dur, maïs...etc), les pratiques culturales les plus rentables en terme de marge brute d'agriculteur, les leviers qui contrôlent les stratégies de valorisation des chaînes de valeurs de certains produits agricoles.....etc.

b/Adoption et choix de la zone d'enquête

La limitation de la zone d'enquête est un passage obligatoire avant la réalisation de l'enquête agricole, ce dernier est en relation directe avec les objectifs tracés au niveau de l'enquête.

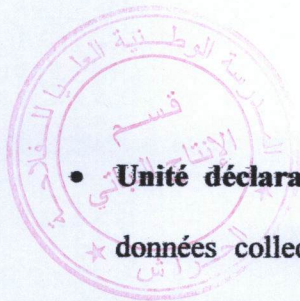
Après avoir déterminé les objectifs de l'enquête, il faut bien définir l'ensemble des termes communs utilisés dans le glossaire du secteur agricole. Parmi ces termes, nous avons :

- **Exploitation agricole :** D'après la FAO (Organization of Food and Agriculture), une exploitation agricole est une unité économique de production agricole soumise à une direction unique et comprenant tous les animaux qui s'y trouvent et toute la terre utilisée entièrement ou en partie pour la production agricole, indépendamment du titre de possession, du mode juridique ou de la taille (FAO, 1995).
- **Parcelle :** C'est une partie de terre de l'exploitation qui est entièrement entourée par des routes, des terres, cours d'eau, maquis, zone urbaine ...etc qui sont pas inclus (ne font pas partie) dans cette exploitation agricole.
- **Champs :** Une partie du terrain située dans une parcelle et qui est séparée du reste de celle-ci (parcelle) par des lignes de démarcation, passage, délimitation cadastrale...etc).



Une culture, plusieurs cultures ou même une association de culture sont généralement pratiqués dans le même champ d'exploitation.

- **Exploitant** : En Algérie, généralement l'exploitant est l'agriculteur dans la plus part des cas. L'exploitant est une personne morale ou physique qui prend les décisions les plus importantes en termes de gestion et utilisation des ressources de l'exploitation agricole. Ce dernier a également toute la responsabilité économique et technique lors de la gestion d'exploitation agricole.
- **Régisseur** : Personne physique ou morale qui assure la responsabilité administrative et économique de la gestion d'une exploitation pour le compte de l'exploitant. Les tâches de régisseur consistent à prendre des décisions de gestion quotidienne qui vont assurer le bon fonctionnement de l'exploitation agricole.
- **Zone d'enquête** : Les dimensions de la zone d'enquête varient en fonction de l'objectif de l'enquête. Elle peut être tout un territoire, une région, une commune ou même une province. Par exemple, en Algérie, les enquêtes agricoles qui portent sur les estimations des rendements des cultures concernent soit une commune (BALADIYA), une Wilaya, une zone de production (e.g. Est, Ouest et Sud de l'Algérie) ou même la totalité du pays.
- **Segment de l'enquête** : c'est l'ensemble des lots qui sont subdivisés sur plusieurs superficies (qui ne se chevauchent pas) couvertes par l'enquête.
- **Variable** : C'est l'ensemble des indicateurs qui caractérisent les systèmes de production, de gestion et du fonctionnement des systèmes de production agricole. Quel que soit la nature des variables estimées en enquête agricole (quantitatives ou qualitatives), ces variables représentent tous les aspects agronomiques, socio-économique et environnementaux (e.g. superficie de l'exploitation agricole, superficie en jachère, type de culture, rotation, assolement, marge brute de l'exploitation, coût d'investissement, capacité et charges, type du labour, nature d'engrais et fertilisants appliqués...etc).



- **Unité déclarante** (recensée) : Elle correspond à l'unité sur laquelle l'ensemble des données collectées sont relatives à une variable bien définie. Généralement, l'unité déclarante est l'exploitation agricole car la majorité des caractéristiques agricole d'un système de production sont systématiquement définies pour une exploitation agricole.

c/ Identification du plan d'échantillonnage

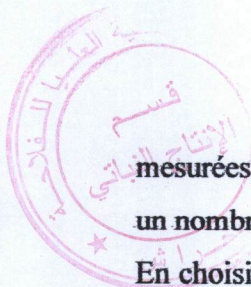
Il existe différents problèmes théoriques et pratiques liés aux méthodes sélectionnées lors de la réalisation d'une enquête agricole. L'absence d'un plan d'échantillonnage ou un plan fragile peut limiter voir freiner la collecte des données pertinentes. L'adoption d'un bon plan d'échantillonnage lors de la préparation et la planification d'enquête agricole nécessite d'exploiter tous les options disponibles sur le plan des méthodes d'enquête. Plusieurs difficultés peuvent être noté lors du choix du plan d'échantillonnage (couverture de la base de sondage, pour les bases de type liste, en particulier) ou plus spécifiques (manque de précision des statistiques relatives au bétail effectuées à partir de bases aréolaires). De plus, l'élaboration du plan d'échantillonnage solide peut être également limitée par les contraintes budgétaires tout en produisant des données fréquentes présentant différents niveaux d'importance statistique.

➤ Quelques techniques d'échantillonnage

Parmi les méthodes d'échantillonnage, on distingue :

a. L'échantillonnage aléatoire

Une sélection aléatoire des échantillons est l'idéal auquel il faut tendre. Pour ce faire, il faut dresser une 'liste' (au moins au niveau conceptuel) de toutes les unités possibles. Des nombres aléatoires (Table aléatoire) sont ensuite utilisés pour déterminer les unités qui seront



mesurées. Par exemple, dans une forêt, chaque arbre pourrait, théoriquement, correspondre à un nombre.

En choisissant des nombres aléatoires, on peut obtenir un échantillon aléatoire d'arbres. De la même façon, dans une zone, chaque point possible peut être affecté de coordonnées à deux dimensions. L'utilisation de deux nombres aléatoires permet de choisir un point aléatoire.

Les nombres aléatoires peuvent être obtenus à partir de tables (voir la fiche éthodologique sur les nombres aléatoires); de nombreuses calculatrices et ordinateurs peuvent également générer des séquences de nombres aléatoires.

Ex : Sur une population de 63 individus, on prélève un échantillon de 5 individus

Séquence de table aléatoire : 3 2 1 6 6 4 3 5 6 9 0 3 1 5 2 2 8

- 1) On doit marquer tous les individus de 1 à 63
- 2) Choisir et sélectionner les chiffres par doublé (car 63 comporte deux chiffres)
- 3) Eliminer toutes les répétitions
- 4) Rejeter le chiffre supérieur à N (63)
- 5) Le dernier individu sélectionné peut être choisir au hasard

Dans ce cas les individus sélectionnés dans cet exemple sont : 32, 16, 35, 03 et 15

b. L'échantillonnage systématique

Dans le cas où un échantillonnage tout à fait aléatoire est impossible ou difficile à obtenir, l'échantillonnage systématique peut constituer une alternative pratique. Avec ce type d'échantillonnage, un point de départ aléatoire est choisi (**repère**), puis des échantillons sont prélevés à intervalles **réguliers**. Pour obtenir des échantillons de faune dans un cours d'eau, on peut les prélever tous les 100 m. Pour obtenir des échantillons d'arbres, le chercheur peut choisir le long de son parcours un arbre d'une espèce donnée tous les dix arbres de cette même espèce.

Cependant, dans ce cas, la population implicitement définie est représentée par les "arbres situés à proximité du parcours", ce qui n'est pas forcément représentatif de tous les arbres.



3	2	1	6	6	4	3	5	6	9
0	3	1	5	2	2	8	7	1	5
6	8	1	7	7	8	9	0	6	0
9	4	2	5	0	6	4	7	9	5
8	6	6	1	8	4	1	1	0	9
9	0	2	0	6	5	4	0	3	2
8	4	1	4	4	3	0	2	0	0
3	5	2	3	2	1	7	0	4	6
8	0	4	8	8	8	1	9	2	8
6	8	9	1	5	0	7	0	2	2
0	2	2	6	4	0	1	7	0	1
0	5	9	5	0	8	2	2	9	5
2	0	4	0	5	4	7	1	1	7
2	3	1	5	5	6	3	5	0	4
6	4	7	5	8	5	5	6	1	1
8	9	4	1	7	5	4	4	9	8
3	1	4	1	8	0	1	1	1	3
4	6	8	7	1	7	1	9	2	7
5	1	1	8	5	4	8	9	0	4
8	0	6	1	1	1	2	5	6	6
5	4	8	5	0	5	9	3	2	8
9	5	9	1	8	6	5	7	1	3
6	1	0	8	1	9	3	2	4	1
7	4	5	1	2	7	5	8	0	6
7	8	5	7	2	0	6	9	6	8
2	3	6	3	4	0	9	8	8	3
0	8	7	2	7	1	3	4	6	1
7	2	7	2	2	7	8	6	1	7
5	9	7	4	0	0	9	2	3	1
3	6	2	8	4	1	8	9	4	4
6	5	6	1	2	6	0	7	6	5
8	6	8	0	8	8	9	5	9	8
7	6	4	8	7	3	8	0	6	7
3	3	0	4	4	1	6	1	7	3
9	2	7	0	6	3	6	3	9	9
3	2	8	5	7	6	1	7	5	2
5	7	3	5	5	3	0	5	5	9
3	9	0	9	3	3	7	3	2	5
5	3	1	0	0	6	1	5	4	9
8	3	9	4	8	5	4	9	1	2
5	5	9	5	8	3	9	3	9	7
1	6	6	0	1	0	4	5	7	0
8	3	9	2	7	9	9	4	8	1
5	8	4	4	6	9	0	1	1	1
5	8	3	8	7	1	5	2	3	4
3	3	4	8	3	8	6	6	7	2

Figure 25 : Exemple d'une table des chiffres aléatoires

c. L'échantillonnage stratifié

L'échantillonnage stratifié est utile lorsque la population peut être divisée en sous-populations ou strates. Un échantillon est alors prélevé dans chaque strate. Cette méthode comporte deux avantages:



- elle garantit que chaque strate de la population est correctement représentée dans l'échantillon;
- elle peut être plus efficace, statistiquement, pour estimer les paramètres de la population.

Ex : Un hydrobiologiste qui souhaite évaluer la population d'insectes aquatiques dans le lit d'une rivière. Il peut y avoir différents habitats (par ex., graviers, sable, limon) sur le même site d'échantillonnage. La zone pourrait être stratifiée selon les habitats et des échantillons pourraient être prélevés dans chaque habitat en proportion du type d'habitat.

Par exemple, si le lit de la rivière sur un site est composé de 25% d'adventices sur des galets, de 50% de gravier et de 25% de boue et qu'on prélève huit échantillons, alors il faut s'assurer d'en prendre quatre dans le gravier et deux dans chacun des autres substrats.

d. L'échantillonnage à plusieurs degrés

L'échantillonnage à plusieurs degrés est souvent effectué pour des raisons administratives, bien qu'il soit moins efficace, statistiquement parlant, qu'un échantillonnage aléatoire simple. Dans ce type d'échantillonnage la population doit être divisée en strates après en sous strates.....etc

Parmi les exemples qui peuvent illustrer cette idée c'est le recensement par exemple de la production céréalière à travers tout le territoire Algérien.

4.2.1.2. La conception du guide d'entretien (questionnaire)

Durant cette phase d'enquête, l'enquêteur doit passer à la conception et la formulation du questionnaire de l'enquête. Lors de la formulation des questions, l'enquêteur doit commencer par les questions les plus simples (adressées aux agriculteurs) à savoir ; le nom, le prénom, l'âge et le niveau intellectuel de l'agriculteur. De plus, les questions les plus détaillées ou/et trop compliquées doivent être reportées à la fin du questionnaire. Néanmoins, l'enquêteur doit répartir l'ensemble des questions par thème. Par exemple, le guide d'entretien (voir section de l'exemple pratique dans le cours : 4.4) peut

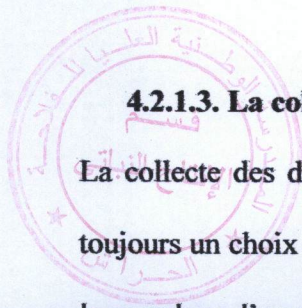


comporter quatre axes : la présentation de l'agriculteur, la compréhension du système de culture, la compréhension du système d'élevage, les contraintes de l'exploitation.

Note : Il est préférable de proposer les questions relatives à l'âge sous forme de tranche ou bien structure d'âge (e.g. Age de 30-40, 40-60 ans....etc). De plus les questions doivent être limitées et simplifiées afin d'éviter de décourager l'agriculteur. Il est important aussi d'utiliser le langage de dialogue commun avec l'agriculteur. Le questionnaire de l'enquête doit être également présenté avec une mise en forme adéquate afin d'inciter et assurer l'attraction de celui qui répondre (agriculteur). Il est utile aussi de tester le questionnaire sur un petit échantillon différent de celui constitué pour l'enquête.

Deux types de question sont généralement posés par les enquêteurs à savoir :

- **Question fermée :** Généralement c'est une question avec une réponse simple, rapide et facile à assimiler. Ce sont les questions dont les réponses seront un OUI ou un NON, des réponses avec des graduations (e.g. faible, moyen ou élevé....etc) ou bien des réponses à choix multiples : choisir une catégorie parmi plusieurs catégories proposées.
- **Question ouverte :** Pour celle-ci, l'agriculteur a la liberté totale pour s'exprimer, dans ce cas-là aucun choix n'est proposé par l'enquêteur. Les questions ouvertes peuvent être considérées comme des questions *d'opinion* (e.g. Que pensez-vous du semis direct ? le semis directe est plus rentable pour toi que le travail conventionnel ?) , des questions ouvertes *de fait* (e.g. Quelles sont vos difficultés en termes de mécanisation de la récolte durant les 10 dernière années), ou bien des questions ouvertes numériques (e.g. Quel est le rendement moyen du blé dans vos parcelles durant les 10 dernières années ?).
-



4.2.1.3. La collecte des réponses

La collecte des données de l'enquête nécessite le choix du mode de collecte qui n'est pas toujours un choix évident. Ce dernier dépend étroitement du coût de l'enquête agricole désiré, le nombre d'enquêteurs, nature et degré de spécialisation du thème de l'enquête. Les modalités de l'exécution de l'enquête se fait directement en face à face ou a distance, soit par téléphone, E-mail ou même par un questionnaire en ligne. Durant l'entretien, il est primordiale d'assurer et confirmer que l'agriculteur a bien assimilé la question, et n'essayer jamais d'influencer la réponse de l'agriculteur.

4.2.1.4. Les traitements des données de l'enquête agricole

Les traitements des données collectées suite a une enquête agricole doivent faciliter la prise de décision. Il est donc important de chercher a présenter de manières attractives et compréhensibles les points clés de l'étude. A cet effet, plusieurs analyses descriptives et statistiques sont très utiles pour exploiter les données issues de l'enquête agricole à savoir :

- **Tris à plat et croisés:** Exprimer les résultats de chaque question en valeur absolue et aussi en valeur relative (en pourcentage). La présentation des résultats avec des tris croisés va permettre également l'obtention d'une présentation en ensemble (deux résultats relatif à deux questions différentes).
- **Les analyses multi-variées :** Plusieurs analyses multi-variées sont très utiles pour explorer les résultats de l'enquête agricole. Ce sont des analyses qui permettent la mise en évidence la relation entre l'ensemble des réponses collectées en fonction de l'ensemble des individus enquêtés. Parmi ces analyses statistiques multi-variées, nous avons :
 - **L'ACP :** Analyse en composante principale
 - **L'AHC :** Analyse Ascendante de Classification Hiérarchique
 - **L'ACM :** Analyse des Correspondances Multiple
 - **L'AFC :** Analyse Factorielle des Correspondances

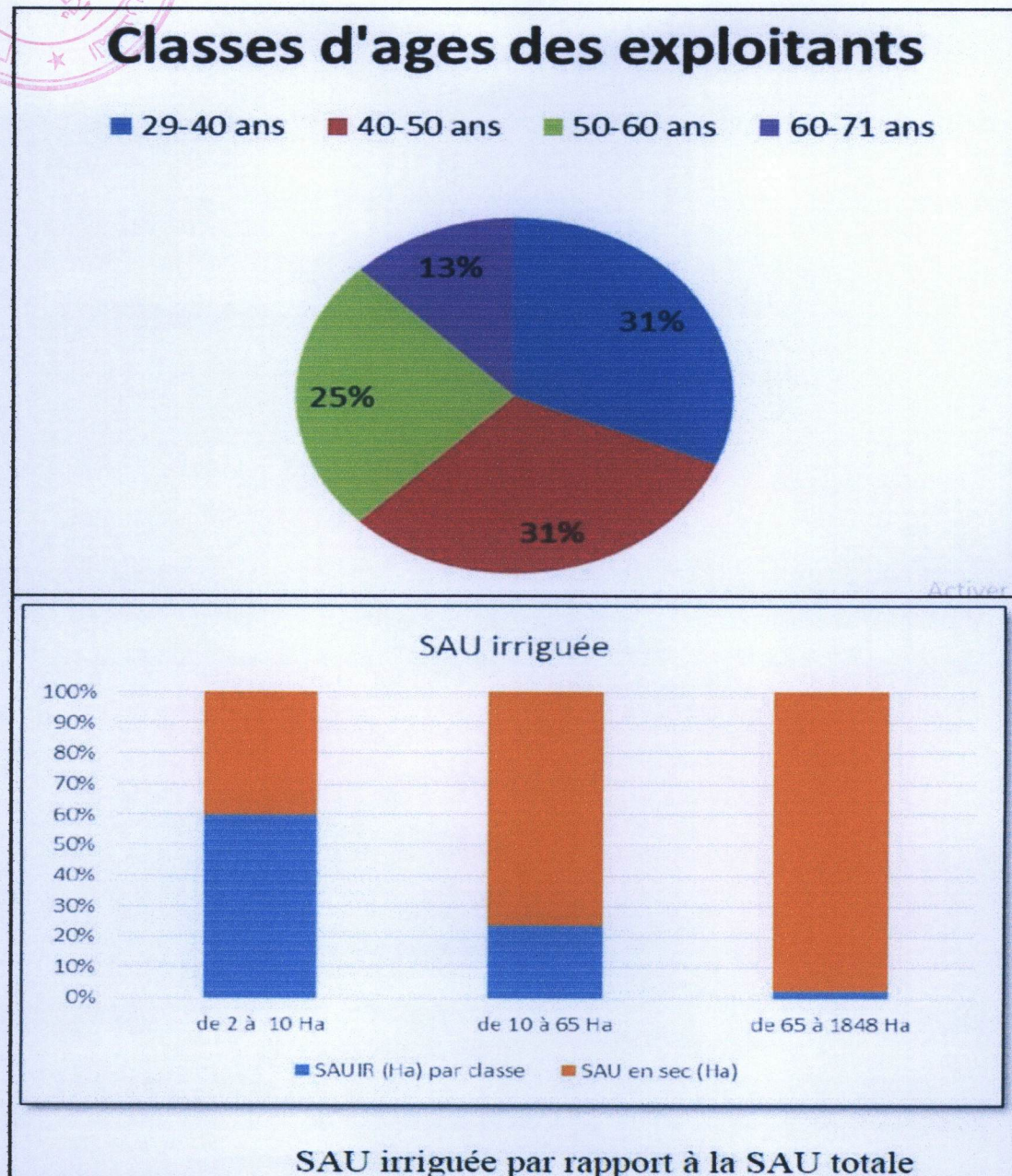
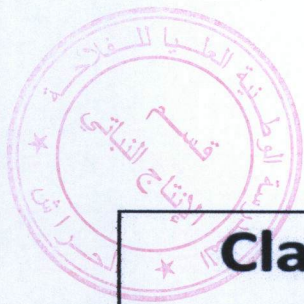
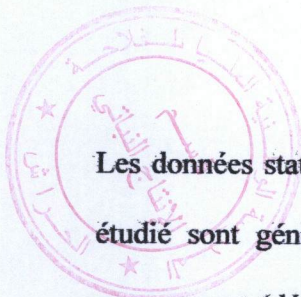


Figure 26 : Représentation graphique de quelques résultats d’une enquête agricole sur la caractérisation des systèmes de production végétale en Algérie (SAU : surface agricole utile, IR :surface irriguée)

4.3. Les différents types d’enquêtes statistiques agricoles

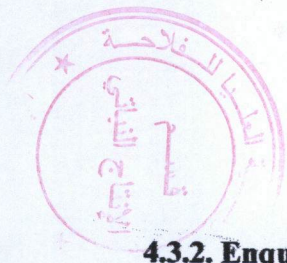


Les données statistiques lors d'une enquête agricole sur l'ensemble des variables du secteur étudié sont généralement collectées à travers deux types fondamentaux d'enquêtes : Un recensement (dénombrement) agricole ou un sondage agricole. Dans la plus part des études, ces deux méthode sont complémentaires dont la planification des sondages agricoles dépend étroitement de la disponibilité des données du recensement agricole.

4.3.1. Recensement agricole

La collecte des données relatives à l'ensemble des variables du secteur étudié (superficies cultivées, rendements, pratiques culturales, efficience économique....etc) se fera sur toutes les unités recensées dans le cas du recensement agricole. Par exemple, Si l'objective de l'enquête est d'estimer le rendement des céréales dans une zone précise, l'enquêteur doit estimer les variables dans toutes les exploitations agricoles (unité recensée) céréalières dans cette zone. Par conséquence, les recensements agricole fournissent des données très détaillées sur une échelle très vaste (la plus petite subdivision administrative, statistique et politique dans un pays : commune, daïra et wilaya). A cet effet, les recensements agricoles constituent une opération très difficile à gérer en termes de temps et de moyens pour la mise en oeuvre de l'enquête agricole. Ces dernières difficultés sont plus particulièrement prononcées au niveau des zones agricoles avec un grand nombre d'exploitations agricoles. De plus, les erreurs d'omission, de surestimations ou sous-estimation des variables et de traitement des données sont plus probable lors des recensements agricoles par rapport au sondage agricole.

Les recensements agricoles ne sont pas considérés comme un moyen pratique pour la caractérisation des secteurs agricoles en termes de précision statistique. La précision statistique de ce type d'enquête n'est pas valable à long terme, ce qui nécessite l'adoption d'autres types d'enquête à base de sondage agricole. A travers l'exploitation des résultats issus des recensements agricoles bien cadrés (avec plus de précision) sont considérés comme un outil très puissant (une référence) pour la planification des sondages agricole.



4.3.2. Enquête par sondage

Les enquêtes par sondage consistent à estimer les variables au niveau d'un échantillon d'unités recensées. Généralement, ce type d'enquête vise à quantifier les différentes variables de la structure agricole.

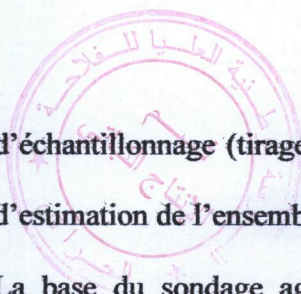
4.3.2.1. Enquête par sondage agricole non probabiliste

C'est l'enquête qui consiste à mesurer les variables du secteur agricole sur un échantillon non probabiliste. Ces enquêtes estiment l'ensemble des variables sans recours aux méthodes d'échantillonnage probabiliste (type d'échantillonnage, taille de population, erreur statistique....etc).

L'enquête par sondage non probabiliste est considérée comme enquête subjective dont le choix des exploitations enquêtées est sélectif (en fonction des avis des experts, sélection d'un nombre limité d'exploitation à partir du registre administrative de la DSA : Direction des services agricoles, évaluation rapide....etc). Les enquêtes non probabilistes sont généralement caractérisées par une faible précision statistique, cette dernière dépend de l'objectif tracé dans l'enquête. De plus, ces enquêtes sont plus utiles particulièrement dans le cas d'estimations des variables dynamiques et peu complexes et (e.g. superficies des terres agricoles, effectifs du cheptel...etc).

4.3.2.1. Enquête par sondage agricole probabiliste

Ce sont les enquêtes agricoles conçues avec des méthodes d'échantillonnage probabilistes impliquant le calcul de la précision statistique pour l'ensemble des estimations collectées. Ces enquêtes nécessitent la spécification et la définition de plusieurs paramètres, règles et bases d'échantillonnage (population enquêtée, procédés d'échantillonnage probabiliste, variables enquêtées....etc) afin de définir le plan de sondage. Le plan de sondage d'une enquête agricole probabiliste est basé sur (i) l'identification des méthodes et techniques

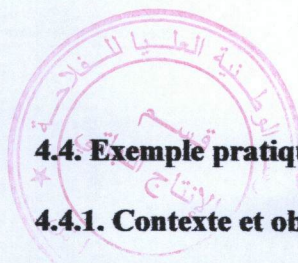


d'échantillonnage (tirage des échantillons) et sur (ii) les méthodes et techniques statistiques d'estimation de l'ensemble des variables enquêtées au sein de l'échantillon retenu.

La base du sondage agricole est constituée par l'ensemble des unités de sondage (e.g. l'ensemble des exploitations agricoles localisées dans les haut plateaux) dans lesquelles l'échantillon est prélevé. Il est important de réaliser un échantillonnage spécifique pour chaque base de sondage homogène (voir la session échantillonnage : 4.2).

➤ *Quelques paramètres statistiques impliqués dans l'estimation des variables enquêtées (voir le cours d'expérimentation)*

- Moyenne
- Médiane
- Variance
- Ecartype et erreur standard
- Coefficient de variation
- Erreur quadratique de la moyenne
- Erreur de la couverture
- L'effet du plan de sondage



4.4. Exemple pratique d'un questionnaire dédié pour une enquête agricole

4.4.1. Contexte et objectif de l'étude

Le questionnaire représenté ci-dessous correspond à une étude de master Mlle. Camille Lupinko (Lupinko Camille, 2018) dirigé par M. LATATI Mourad et BELHOUCLETTE HATEM. Cette étude porte sur l'utilisation d'un modèle bioéconomique comme outil d'aide à la réflexion pour la conception de systèmes de production plus efficaces et plus résilients dans la wilaya de Sétif – Algérie.

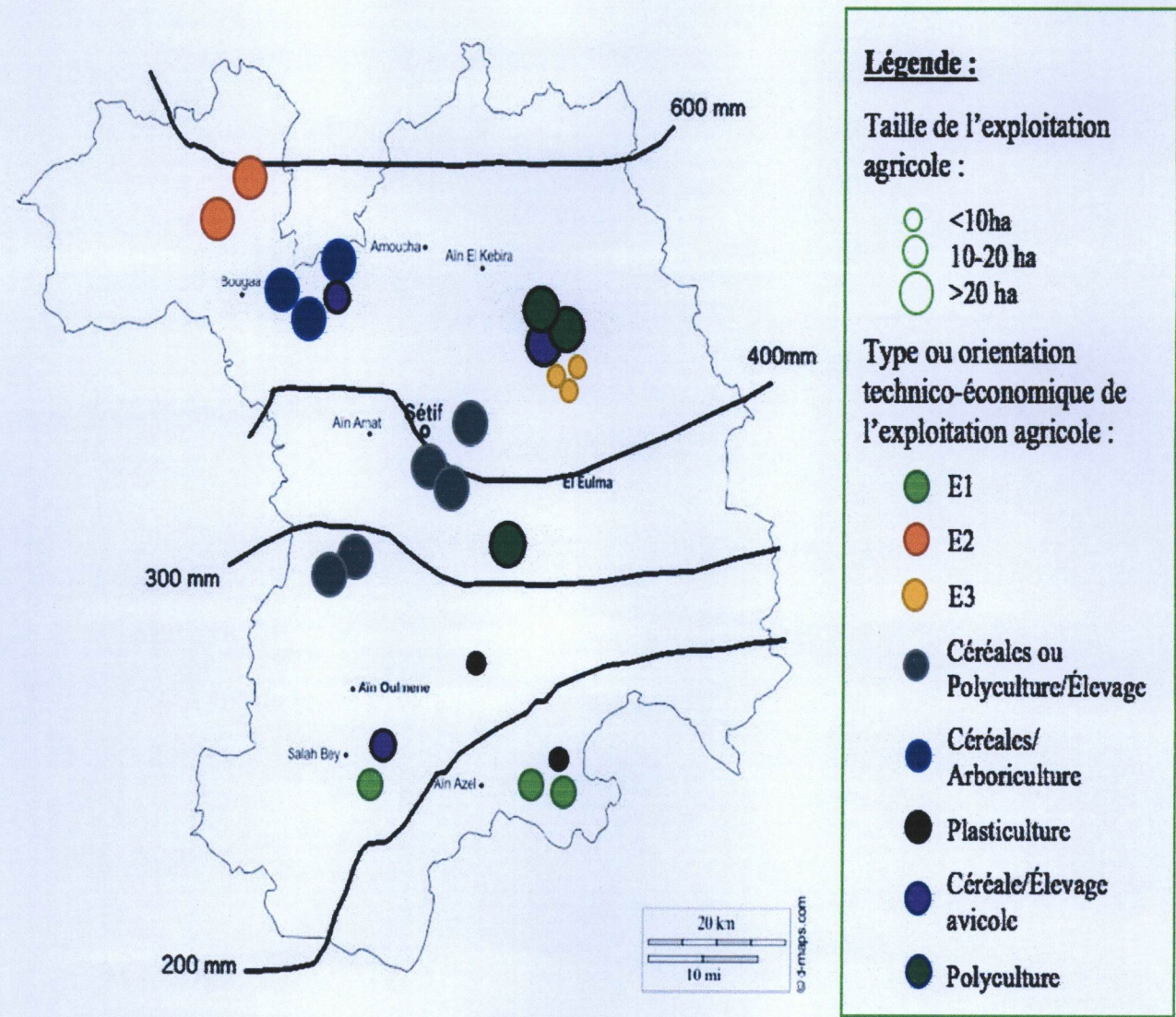
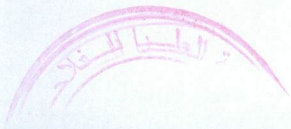


Figure 27 : Localisation des exploitations agricoles enquêtées à Sétif (Lupinko, 2018)



L'objectif spécifique de l'enquête agricole réalisée dans cette étude était la collecte des données quantitatives sur l'ensemble des systèmes de production animale et végétale au niveau de plus de 36 exploitations agricoles réparties dans le Nord, Sud et Centre de la Wilaya de Sétif. L'objectif finale de cette enquête était la compréhension du fonctionnement de ces exploitations (points de force et point de faiblesse) afin d'étudier à travers la modélisation bioéconomiques la résilience de ces exploitations face aux changements climatiques.

La structure du questionnaire comporte les axes suivants :

- La présentation des informations relatives à l'agriculteur ;
- Informations relative à la description de chaque système de culture ;
- Informations relative à la description de chaque système d'élevage ;
- Les points de force et de faiblesse de l'exploitation.

4.4.2. Structure du questionnaire

1. Consigne initiale

Se présenter et expliquer le but de la recherche:

- *Remerciements*
 - *Expliquer le projet, la démarche de l'entretien et le choix de contacter cet interlocuteur*
-



➤ Informations générales

Nom et Prénom du chef d'exploitation (CE)	
Nom de l'exploitation	
Lieu	
Date de passage	/..../2018
Statut juridique de l'exploitation	☐ Privé individuel ☐ Privé en indivision ☐ EAC ☐ EAI ☐ Ferme pilote ☐ Autres

2. Le système d'activité de l'exploitant:

Depuis combien de temps est-il CE?
.....
.....Comment est-il devenu CE?
.....
.....Appartient-il à des organisations?
.....
.....

3. La répartition du foncier

Surface totale	ha
SAU	ha

Superficie moyennement exploitée	Appartenant à l'exploitant.....ha
	Louée.....ha
Type de ressource hydrique	☐ Puits ☐ Forage



4. La main d'œuvre

Combien de personnes dans le ménage?.....

Nombre de personnes dans le ménage participant à l'activité agricole

L'exploitation fait-elle appel à de la main d'œuvre extérieure ?

☐ OUI ☐ NON

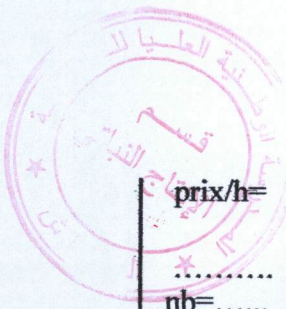
Si oui:

Type de MO(1)	Nb de personnes embauchées	Salaire moyen en DZD(/jours)	Logement et nourriture	Affectation principale

(1) 1-payée à la tâche; 2-payée à la journée; 3-payée à la saison; 4-toute l'année

Le temps de travail disponible par mois (prendre en considération la contrainte climatologique):

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Familiale n b=.....	En j												
	En h/j												
Salariale 1 prix/h=..... nb=.....	En j												
	En h/j												
Salariale 2 prix/h=..... nb=.....	En j												
	En h/j												
Salariale 3	En												



prix/h=	j												
.....	En												
nb=.....	h/j												

5. Production végétale

➤ L'assolement

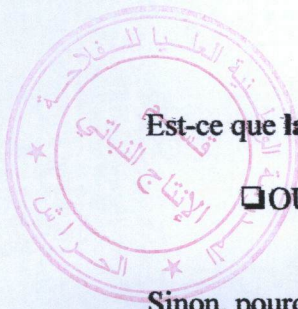
- Calendrier d'occupation par mois (identifier également les périodes d'occupation par l'élevage)

Parcelles	Surface	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

- Variété et précédent cultural par parcelles

Parcelles	Culture ou association de cultures (préciser le % de chaque culture)	Variété	Surface	Précédent cultural (avec type d'irrigation)

➤ Les rendements



Est-ce que la production a été bonne cette année?

☐ OUI ☐ NON

Sinon, pourquoi?

.....

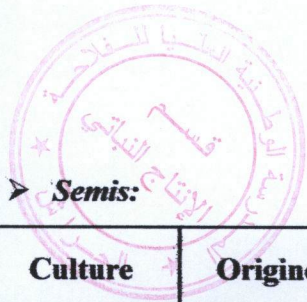
> **Rendements en céréales:**

(Pour les cultures en association, évaluer le rendement par culture)

Culture ou association	Rendements grain moyen (kg/ha) des cinq dernières années	Rendements paille moyen (kg/ha) des cinq dernières années	Résidus sur les cinq dernières années (au moins la hauteur, sinon prévoir un retour en juin pour calculer)

> **Autres rendements:**

Culture ou association	Rendement (kg/ha) des cinq dernières années



➤ **Semis:**

Culture unique ou association	Origine et prix des semences (/kg)	Densité	Prix (DZD/kg)	Variations des prix (5 dernières années)

➤ **Compréhension de l'irrigation:**

Culture unique ou association	Technique d'irrigation	Dose d'irrigation (si non nombre d'heure d'irrigation)	Prix de l'eau par périodes

Quelle est la **superficie totale irriguée**?ha

Le **système d'irrigation** est-il amorti? Si non, combien est payé chaque moi?

➤ **Les Activités post-récoltent**

Où sont **stockées** les productions?

.....

Ya t'il des **pertes**?

.....

Les productions sont-elles **transformées**?

.....

Comment sont-elles **transportées** et où?

.....



Le transport est il autonome? S'il est loué, quel est le prix?

Quelle est la distance?

> La destination des cultures (en%)

Culture ou associati on	Consom mation cheptel	Vendue au souk	Vendue en gros	Vendue à la coopérative	Vendue aux voisins	Semences	Auto con- somma tion humai ne	Autres (préciser)

6. L'élevage

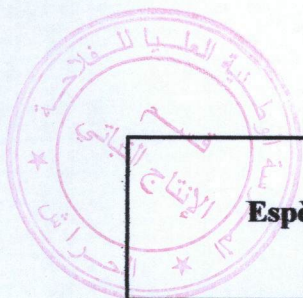
> Les effectifs

Les ovins:

Espèce	Agneaux (<1an)	Agnelles (<1an)	Brebis (>1an)	Bélier (>1an)
Besoins en travail par periodes de l'année				

Nombre de décès cette année (si possible sur les 5 dernières années?):

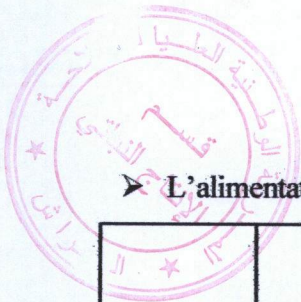
> Les bovins



Espèce	Vaches (>3ans)	Taureaux (>3ans)	Génisses (1-3ans)	Taurillons (1-3ans)	Veaux (0-1an)
Besoins en travail par periods de l'année					

Nombre de décès cette année (si possible sur les 5 dernières années?):

Type	Espèce	Femelles (jeunes)	Femelles (adulte)	Males (jeunes)	Males (adultes)
Caprin					
Poulets de chair					
Poule pondeuse					
Ruches					



➤ L'alimentation pour chaque type d'animal

Type d'aliment	Proportion % par rapport à l'alimentation totale (pour chaque catégorie d'animaux)									Source	Coût unitaire (DZD)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		

Quelles sont les autres dépenses relatives à l'élevage (produits vétérinaires par exemple)?

.....

.....

.....

➤ Les entrées et sorties depuis 1an:

	Entrées					Sorties					
Type	Achat		Naissances	Autres		Quantités vendues		Pertes	Auto consom mation	Autres	
	Nb	Prix	Nb	Nb	Prix	Nb	Prix	Nb	Nb	Nb	Prix
Ovin											
Bovin											
Caprin											



Poulets de chair											
Poules pondeuse											

Si production de lait:
Production moyenne de lait.....(Litres/vaches laitières/jours)
Auto consommation:.....
Prix de vente/L-Variation sur les 5 dernières années?

Quelle utilisation de la **fumure organique**?
.....

Quelle est la **quantité produite** de fumure?
.....

Quelle est la **quantité utilisée** (à quel moment et sur combien d’ha)?
.....

Est-ce que la fumure est **vendue**? Si oui, **quelle quantité** et à **quel prix**?
.....

7. Les contraintes
.....
.....
.....
.....



8. La direction et les souhaits

Quelles sont les **projets du CE**? Que voudrait-il faire/changer dans son exploitation?

.....
.....
.....
.....

Le CE a-t-il pour **projet de se diversifier**? Si oui, dans **quelles productions**?

.....
.....
.....
.....

Le CE prévoit-il d'**investir dans du nouveau matériel**? Si oui, lequel?

.....
.....
.....
.....

L'intérêt pour les **légumineuses** (s'il n'y en a pas, pourquoi)?

.....
.....
.....
.....

9. Les ressources et crédits:

Pluriactivité : ☐ OUI ☐ NON Si oui,

Quelles sont les ressources pour chaque mois? Quel est la part de cet argent qui est utilisé

Dans l'activité agricole?



Activités	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Activité1												
Activité2												
Activité3												

L'exploitation a-t-elle recours aux crédits? ☐ OUI ☐ NON

Si non,pourquoi?.....

Si oui, emprunts réalisés en cours pour l'année et coût de l'amortissement chaque mois:

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



10. Les facteurs limitants

Qu'est-ce qui nuit le plus à la production?

.....

.....

.....

.....

Qu'est-ce qui fait qu'une année est mauvaise?

.....

.....

.....

.....

Dans le futur, comment le CE pense que le contexte agricole va évoluer?

.....

.....

.....

.....

Ya-t-il une contrainte au niveau de l'eau?

.....

.....

.....

.....

11. Les contraintes futures

Quelles sont les craintes futures de la CE?



.....
.....
.....

Un accès a l’irrigation difficile ?

.....
Une insuffisance de la main d’ouvre ?
.....

Un accès aux terres qui est plus ou moins difficile?

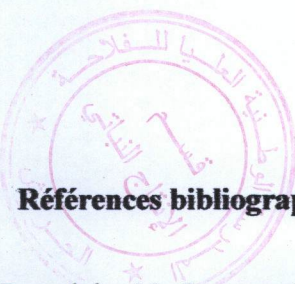
.....
Ya t’il une augmentation de l’innovation dans les grandes exploitations agricoles ?
.....

Une fluctuation des prix nationaux ?

.....
Une fréquence des sécheresses plus importantes ?
.....

Quelles sont les **opportunités potentielles** que voit le CE?

.....
.....
.....
.....



Références bibliographiques

- Beaudoin, N., Launay, M., Sauboua, E., Ponsardin, G., Mary, B., 2008. Evaluation of the soil crop model STICS over 8 years against the "on farm" database of Bruyeres catchment. Eur. J. Agron. 29, 46e57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2008.03.001>.
- Brisson, N., Casals, M.-L., 2005. Leaf dynamics and crop water status throughout the growing cycle of durum wheat crops grown in two contrasted water budget conditions. Agron. Sustain. Dev. 25, 151e158. <http://dx.doi.org/10.1051/agro:2004066>.
- FAO (1995) Programme du recensement mondiale de l'agriculture 2000. Collection FAO. Développement Statistique N°5, Rome, Italie.
- FAO (1996) Enquête agricole à base de sondage multiple : Enquêtes courantes fondées simultanément sur des méthodes de sondages aréolaires et de sondage par listes d'exploitations. Volumes 1. Collection FAO. Développement Statistique N°7, Rome, Italie.
- Haefner, J W (1992) Parallel computers and individual-based models: An overview: 126-164 in D. DeAngelis and L. Gross, editors. Individual-based Models and Approaches in Ecology: Populations, Communities, and Ecosystems.
- Haefner, J W. and Crist T O (1994) Spatial model of movement and foraging in harvester ants (*Pogonomyrmex*) (I): The roles of memory and communication. Journal of Theoretical Biology 166:299-313.
- Haefner JW (2005) Modeling biological system: Principle and application. 2nded. Springer. USA, 485p.



JUILLET B (2006) MODÉLISATION compartimentale du métabolisme interrégional de l'azote alimentaire et des génétiques de l'urée à l'état nourri non-stationnaire chez l'homme. Institut national agronomique. Thèse doctorat. Paris, Grignon. 201 p.

Ibrahim H, Hatira A, Pansu M (2013) Modelling the functional role of microorganisms in the daily exchanges of carbon between atmosphere, plants and soil. *Proc Env Sci* 19: 96-105.

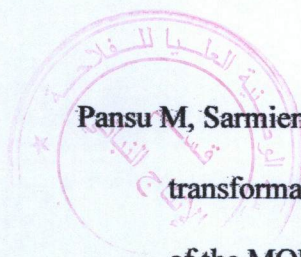
Latati M, Modélisation de la dynamique du carbone et de l'azote dans le système d'association légumineuses-céréales: Rôle fonctionnel de la symbiose rhizobienne dans le contrôle de la biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère. Thèse doctorat. ENSA, El Harrach. 165 p.

Lupinko, C (2018) Utilisation d'un modèle bioéconomique comme outil d'aide à la réflexion pour la conception de systèmes de production plus efficaces et plus résilients dans la wilaya de Sétif – Algérie. Mémoire de Master, IAMM, Montpellier, France, 107 p.

Pansu M, et Gautheyrou J (2006) *Handbook of soil analysis - mineralogical, organic and inorganic methods*. Springer, Paris, Berlin, Heidelberg, New York, 993 p.

Pansu M, Sarmiento L, Metselaar K, Hervé D, Bottner P (2007) Modelling the transformations and sequestration of soil organic matter in two contrasting ecosystems of the Andes. *European Journal of Soil Science* doi :10.1111/j.1365-2389.2006.00867.

Pansu M, Martineau Y, Saugier B (2009) A modelling method to quantify in situ the input of carbon from roots and the resulting C turnover in soil. *Plant Soil* 317:103-120.



Pansu M, Sarmiento L, Rujano MA, Ablan M, Acevedo D, Bottner P (2010) Modeling Organic transformations by Micro-Organisms of Soils in six contrasting ecosystems: validation of the MOMOS model. *Global Biogeochemical Cycles* 24:GB1008.

Stockle, C. O. , S. Martin and G. S. Campbell. 1994. CropSyst, a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems* 46:335-359.